



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Industrial

Unidad de Posgrado

**Diseño e implementación de una torre de enfriamiento
con un relleno alternativo identificando las
correlaciones de la tasa global de transferencia de calor
y caída de presión**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Industrial

AUTOR

Armando Fabrizzio LÓPEZ VARGAS

ASESOR

Dr. Luis Alberto GARRIDO SCHAEFFER

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

López, A. (2019). *Diseño e implementación de una torre de enfriamiento con un relleno alternativo identificando las correlaciones de la tasa global de transferencia de calor y caída de presión*. Tesis para optar grado de Doctor en Ingeniería Industrial. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

INFORMACIÓN

CÓDIGO ORCID DEL AUTOR: NO APLICA

CÓDIGO ORCID DEL ASESOR: <https://orcid.org/0000-0002-3304-4566>

GRUPO DE INVESTIGACIÓN: NO APLICA

INSTITUCIÓN FINANCIADA PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACIÓN:

Financiamiento de tesis – Universidad Politecnica Salesiana - Ecuador

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE DESARROLLÓ LA

INVESTIGACIÓN: Laboratorio de termofluidos de la Universidad Politecnica Salesiana Guayaquil - Ecuador

AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACIÓN ABARCÓ: 2 años

DNI: 0912034790



**UNIVERSIDAD NACIONAL
MAYOR DE SAN MARCOS**

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 10-UPG-FII-2019

**SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO
DE DOCTOR EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

En la ciudad de Lima, del día diecinueve del mes de julio del dos mil diecinueve, siendo las quince horas, en acto público se instaló el Jurado Examinador para la Sustentación de la Tesis titulada: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON UN RELLENO ALTERNATIVO IDENTIFICANDO LAS CORRELACIONES DE LA TASA GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y CAÍDA DE PRESIÓN”**, para optar el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Industrial.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas del Jurado Examinador se procedió a la calificación individual y secreta, habiendo sido..... *Aprobado* con la calificación de..... *Dieciseis (16)*

El Jurado recomienda que la Facultad acuerde el otorgamiento del Grado Académico de Doctor en Ingeniería Industrial, al **Mg. LÓPEZ VARGAS, ARMANDO FABRIZIO**.

En señal de conformidad, siendo las..... *16:00* horas se suscribe la presente acta en cuatro ejemplares, dándose por concluido el acto.

[Firma]
Dr. INCHE MITMA, JORGE LUIS
Presidente

[Firma]
Dr. SANTOS DE LA CRUZ, EULOGIO GUILLERMO
Miembro

[Firma]
Dr. CHUNG PINZÁS, ALFONSO RAMÓN
Miembro

[Firma]
Dr. SEVALLOS AMPUERO, JUAN MANUEL
Miembro

[Firma]
Dr. GARRIDO SHAEFFER, ALBERTO
Asesor

AGRADECIMIENTO

Al culminar el presente trabajo de investigación con éxito, quiero agradecer a Dios por estar siempre a mi lado para poder cumplir con este nivel académico, a la prestigiosa Universidad Nacional Mayor de San Marcos por haberme transmitido los saberes académicos y científicos, mi sincero agradecimiento a los docentes del programa de Doctorado en Ingeniería Industrial. Agradezco al Dr. Alberto Garrido por haberme guiado satisfactoriamente. Así también, a mis amigos MSc. Iván Suárez y MSc. Virgilio Ordóñez, compañeros de aula y días de estudio y mucho sacrificio. Agradezco a las personas que colaboraron en mi tema de investigación y especialmente a nuestra querida Universidad Politécnica Salesiana.

Armando Fabrizio López Vargas

DEDICATORIA

Con infinito amor dedico el presente trabajo de investigación a mi querida y amada esposa Lorena Tapia quién con su invalorable apoyo constante en ausencia de nuestro hogar me ha motivado para seguir adelante en mi vida profesional y cumplir exitosamente este grado académico, a mis queridos hijos Fabrizzio, Bryan y Sandy quienes han sido mi inspiración constante y han compartido conmigo momentos de inmensa alegría y tristeza, a mis hermanas Sharon, Shirley y finalmente a mis padres Armando y Norma que siempre estuvieron pendientes y ayudaron a cumplir cada una de mis metas que me he propuesto cumplir a lo largo de mi existencia.

Armando Fabrizzio López Vargas

RESUMEN

El presente trabajo de investigación Doctoral está orientado a la realización de los respectivos cálculos para el diseño, selección de los diferentes elementos del que consta un prototipo de torre de enfriamiento y posterior implementación de la misma, cuyo objetivo es el de ser utilizada por los alumnos del Laboratorio de termofluidos de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, con el objetivo de tener una mayor comprensión del proceso de intercambio de calor mediante el enfriamiento del agua, además, se realizó el estudio con un relleno alternativo para encontrar las correlaciones experimentales de la tasa de transferencia de masa y caída de presión.

Los cálculos y selección de los diferentes equipos se lo realizaron aplicando los conocimientos adquiridos en las distintas ramas de la Ingeniería y también a partir de datos experimentales y variables de procesos obtenidos en los ensayos realizados en el equipo implementado.

Se realizaron ensayos en un prototipo de torre de enfriamiento de agua de tiro inducido, con un relleno alternativo, variando las cantidades de aire y agua que corre por unidad de área, para determinar las correlaciones de caída de presión y transferencia de masa, a través del procesamiento de los datos de los factores estudiados y su correspondiente análisis estadístico.

Palabras claves: Torre de enfriamiento, relleno, transferencia de masa, caída de presión.

SUMMARY

This Doctoral research work is oriented to the realization of the respective calculations for the design, selection of the different elements of which there is a prototype tower of cooling and subsequent implementation of the same, whose objective is to be used by the students of the Thermofluids Laboratory of the Industrial Engineering career of the Salesian Polytechnic University in Guayaquil headquarters for understanding the process of heat exchange through the cooling of the water, in addition the study was carried out with an alternative filling to find the experimental correlations of the transfer rate of mass and pressure drop.

The calculations and selection of the different equipment were carried out applying the knowledge acquired in the different branches of the Engineering and also from experimental data and process variables obtained in the tests carried out on the implemented equipment.

Tests were carried out on a prototype of an induced draft water cooling tower, with an alternative filling, varying the water and air flow rates per unit area to determine the mass transfer and pressure drop lines, through the processing of the data of the factors studied and their corresponding statistical analysis

Keywords: Cooling tower, filling tower, mass transfer, pressure drop.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ACEPTACIÓN DE TESIS	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
RESUMEN	V
SUMMARY	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE TABLAS	X
INDICE DE FIGURAS.....	XV
INDICE DE ANEXOS	XVI
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XVII
 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	 1
1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA GENERAL	3
1.2.2 FORMULACIÓN DE LOS PROBLEMAS SECUNDARIOS.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	3
1.4 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	4
1.5 OBJETIVOS	4
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	 6
2.1 MARCO FILOSÓFICO O EPISTEMOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN:	6
2.2 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN.....	11
2.3 BASES TEÓRICAS.....	12
2.3.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO	12
2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO	13
2.3.2.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO NATURAL.	14
2.3.2.2 TORRES DE ENFRIAMIENTO CON VENTILACIÓN MECÁNICA	15
2.3.2.3 CONDENSADORES EVAPORATIVOS / TORRES A CIRCUITO CERRADO	17
2.3.2.4 EQUIPOS MIXTOS.....	17
2.3.2.5 CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA FORMA EN QUE EL AIRE ATRAVIESA EL RELLENO.....	18
2.3.3 RELLENOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO (TE)	19
2.3.3.1 ECUACIÓN CARACTERÍSTICA PARA LOS RELLENOS	22
2.3.4 FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS.....	24

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	34
3.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	34
3.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	34
3.3 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	35
3.4 UNIDAD DE ANÁLISIS	36
3.5 POBLACIÓN DE ESTUDIO	36
3.6 TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	37
3.7 SELECCIÓN DE LA MUESTRA	37
3.8 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	37
 CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO Y DETERMINACIÓN DE CORRELACIONES DE OPERACIÓN PARA EL RELLENO ALTERNATIVO.....	38
4.1 ELECCIÓN DEL TIPO DE TE.....	38
4.2 ELECCIÓN DEL TIPO DE RELLENO	39
4.3 CALCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.....	40
4.4 SELECCIÓN DEL VENTILADOR	41
4.5 SELECCIÓN DE LA BOMBA DE AGUA.....	41
4.6 OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.....	42
4.6.1 OBTENCIÓN DE DATOS TÉRMICOS	42
4.6.2 OBTENCIÓN DE LOS DATOS PARA CAÍDA DE PRESIÓN EN EL RELLENO ALTERNATIVO	46
4.6.3 PROCESAMIENTO DE DATOS Y OBTENCIÓN DE COEFICIENTES PARA LA CORRELACIÓN SELECCIONADA PARA LA TASA DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	48
4.6.4 DETERMINACIÓN DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA.....	79
4.6.5 PRUEBAS DE HIPÓTESIS.....	80
 CAPÍTULO 5: IMPACTOS - ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO.....	104
5.1 INVERSIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.	104
5.1.1 INVERSIÓN EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR	104
5.1.2 INVERSIÓN EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO.....	107
5.2 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	110
5.2.1 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO	111
5.2.2 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PROYECTADOS POR EL PERIODO DE VIDA ÚTIL	112

5.2.2.1 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PROYECTADOS POR UN PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR	113
5.2.2.2 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PROYECTADOS POR UN PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO.....	114
5.3 FLUJO DE INVERSIÓN Y COSTOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	114
5.3.1 FLUJO DE INVERSIÓN Y COSTOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR	114
5.3.2 FLUJO DE INVERSIÓN Y COSTOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO.....	117
5.4 BENEFICIARIOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	119
5.5 ANÁLISIS COSTO EFICIENCIA DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	120
5.5.1 DETERMINACIÓN DEL VALOR ACTUAL DE LOS COSTOS.....	121
5.5.2 NÚMERO DE BENEFICIARIOS	122
5.5.3 ANÁLISIS DE COSTO - EFICIENCIA.....	122
5.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO EFICIENCIA DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	123
CONCLUSIONES	125
RECOMENDACIONES.....	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
ANEXOS	135

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 4

TABLA 4.1 DETERMINACIÓN DEL RANGO DE OPERACIÓN DE LA BOMBA DE AGUA	41
TABLA 4.2 OBTENCIÓN DE DATOS TÉRMICOS A 0.7074 KG/SM ²	44
TABLA 4.3 OBTENCIÓN DE DATOS TÉRMICOS A 0.88 KG/SM ²	44
TABLA 4.4 OBTENCIÓN DE DATOS TÉRMICOS A 1.06 KG/SM ²	45
TABLA 4.5 OBTENCIÓN DE DATOS TÉRMICOS A 1.33 KG/SM ²	45
TABLA 4.6 OBTENCIÓN DE DATOS DE CAÍDA DE PRESIÓN A 0.7074 KG/SM ²	46
TABLA 4.7 OBTENCIÓN DE DATOS DE CAÍDA DE PRESIÓN A 0.88 KG/SM ²	47
TABLA 4.8 OBTENCIÓN DE DATOS DE CAÍDA DE PRESIÓN A 1.06 KG/SM ²	47
TABLA 4.9 OBTENCIÓN DE DATOS DE CAÍDA DE PRESIÓN A 1.33 KG/SM ²	48
TABLA 4.10 ENTALPÍA DE SATURACIÓN DEL AIRE	49
TABLA 4.11 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 1.....	50
TABLA 4.12 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 2.....	50
TABLA 4.13 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 3.....	51
TABLA 4.14 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 4.....	51
TABLA 4.15 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 5.....	52
TABLA 4.16 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 6.....	52
TABLA 4.17 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 7.....	53
TABLA 4.18 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 8.....	53
TABLA 4.19 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 9.....	54
TABLA 4.20 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 10.....	54
TABLA 4.21 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 11.....	55
TABLA 4.22 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 12.....	55
TABLA 4.23 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,	

<i>MUESTRA 13.....</i>	<i>56</i>
<i>TABLA 4.24 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 14.....</i>	<i>56</i>
<i>TABLA 4.25 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 15.....</i>	<i>57</i>
<i>TABLA 4.26 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 16.....</i>	<i>57</i>
<i>TABLA 4.27 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 17.....</i>	<i>58</i>
<i>TABLA 4.28 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 18.....</i>	<i>58</i>
<i>TABLA 4.29 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 19.....</i>	<i>59</i>
<i>TABLA 4.30 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 20.....</i>	<i>59</i>
<i>TABLA 4.31 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 21.....</i>	<i>60</i>
<i>TABLA 4.32 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 22.....</i>	<i>60</i>
<i>TABLA 4.33 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 23.....</i>	<i>61</i>
<i>TABLA 4.34 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 24.....</i>	<i>61</i>
<i>TABLA 4.35 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 25.....</i>	<i>62</i>
<i>TABLA 4.36 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 26.....</i>	<i>62</i>
<i>TABLA 4.37 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 27.....</i>	<i>63</i>
<i>TABLA 4.38 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 28.....</i>	<i>63</i>
<i>TABLA 4.39 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 29.....</i>	<i>64</i>
<i>TABLA 4.40 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 30.....</i>	<i>64</i>
<i>TABLA 4.41 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 31.....</i>	<i>65</i>
<i>TABLA 4.42 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	
<i>MUESTRA 32.....</i>	<i>65</i>
<i>TABLA 4.43 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,</i>	

MUESTRA 33.....	66
TABLA 4.44 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 34.....	66
TABLA 4.45 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 35.....	67
TABLA 4.46 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 36.....	67
TABLA 4.47 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 37.....	68
TABLA 4.48 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 38.....	68
TABLA 4.49 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 39.....	69
TABLA 4.50 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 40.....	69
TABLA 4.51 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 41.....	70
TABLA 4.52 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 42.....	70
TABLA 4.53 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 43.....	71
TABLA 4.54 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 44.....	71
TABLA 4.55 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 45.....	72
TABLA 4.56 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 46.....	72
TABLA 4.57 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 47.....	73
TABLA 4.58 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 48.....	73
TABLA 4.59 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 49.....	74
TABLA 4.60 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 50.....	74
TABLA 4.61 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 51.....	75
TABLA 4.62 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 52.....	75
TABLA 4.63 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,	

MUESTRA 53.....	76
TABLA 4.64 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 54.....	76
TABLA 4.65 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 55.....	77
TABLA 4.66 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 56.....	77
TABLA 4.67 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 57.....	78
TABLA 4.68 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA, MUESTRA 58.....	78
TABLA 4.69 DETERMINACIÓN DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA Y TASA GLOBAL DE TRANSFERENCIA MÁXIMA.	79
TABLA 4. 70 COEFICIENTES DE REGRESIÓN DE CÁIDA DE PRESIÓN.....	88
TABLA 4.71 COEFICIENTES DE REGRESIÓN DE TASA GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE MASA	103

CAPÍTULO 5

TABLA 5.1 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR SIN IVA.	105
TABLA 5.2 INSUMOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR	105
TABLA 5.3 MANO DE OBRA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR	106
TABLA 5.4 INVERSIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	107
TABLA 5.5 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO.....	107
TABLA 5.6 INSUMOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO.....	108
TABLA 5.7 MANO DE OBRA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO.....	109
TABLA 5.8 INVERSIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.....	109
TABLA 5.9 TOTAL DE INVERSIÓN PARA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	110
TABLA 5.10 COSTOS ANUALES PARA LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	111
TABLA 5.11 COSTOS ANUALES DE RELLENO ESTÁNDAR DE UN PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	111
TABLA 5.12 COSTOS ANUALES DEL RELLENO ALTERNATIVO PROPUESTO EN LA	

<i>INVESTIGACIÓN DE UN PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....</i>	<i>112</i>
<i>TABLA 5.13 TAZA DE INFLACIÓN ESPERADA.....</i>	<i>113</i>
<i>TABLA 5.14 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PROYECTADOS POR UN PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR (SIN IVA)..</i>	<i>113</i>
<i>TABLA 5.15 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PROYECTADOS POR UN PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO (SIN IVA).....</i>	<i>114</i>
<i>TABLA 5.16 FLUJO DE INVERSIÓN Y COSTOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR</i>	<i>115</i>
<i>TABLA 5.17 FLUJO DE INVERSIÓN Y COSTOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR CONSIDERANDO EL IVA.</i>	<i>116</i>
<i>TABLA 5.18 FLUJO DE INVERSIÓN Y COSTOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO.....</i>	<i>117</i>
<i>TABLA 5.19 FLUJO DE INVERSIÓN Y COSTOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO CONSIDERANDO EL IVA.....</i>	<i>118</i>
<i>TABLA 5.20 ESTIMADO DEL NÚMERO DE ALUMNOS BENEFICIARIOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DURANTE SU PERIODO DE VIDA ÚTIL</i>	<i>119</i>
<i>TABLA 5.21 VALOR ACTUAL DE LOS COSTOS DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....</i>	<i>122</i>
<i>TABLA 5.22 RATIO COSTO-EFICIENCIA DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....</i>	<i>123</i>
<i>TABLA 5.23 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COSTO EFICIENCIA DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ESTÁNDAR</i>	<i>124</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	13
FIGURA 2.2 TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO NATURAL	14
FIGURA 2.3 TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO	15
FIGURA 2.4 TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO.....	16
FIGURA 2.5 TORRE DE ENFRIAMIENTO A CIRCUITO CERRADO.....	17
FIGURA 2.6 TORRE DE ENFRIAMIENTO MIXTA.....	18
FIGURA 2.7 TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO	19
FIGURA 2.8 FORMA BÁSICA DE RELLENO POR SALPICADO.....	20
FIGURA 2.9 RELLENO DE SALPICADO DE FORMAS GEOMÉTRICAS COMPLEJAS.....	20
FIGURA 2.10 RELLENO DE PELÍCULA	21
FIGURA 2.11 RELLENO MIXTO	22
FIGURA 2.12 BALANCE DE ENERGÍA EN EL INTERIOR DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	26
FIGURA 2.13 GRÁFICA DE OPERACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	27

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1 MATERIAL DE RELLENO ALTERNATIVO	39
FIGURA 4.2 REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES	42
FIGURA 4.3 OBTENCIÓN DE DATOS TÉRMICOS	43
FIGURA 4.4 DISPERSIÓN DE PRESIÓN CON RESPECTO A LA VELOCIDAD	85
FIGURA 4.5 CORRELACIÓN ENTRE LOG PRESIÓN Y VELOCIDAD	85
FIGURA 4.6 RESULTADOS ANÁLISIS REGRESIÓN PARA CAMBIOS DE PRESIÓN	86
FIGURA 4.7 DISPERSIÓN Y CORRELACIÓN ENTRE FLUJO MÁSCO DE AIRE Y TASA TRANSFERENCIA DE CALOR.	91
FIGURA 4.8 ANÁLISIS DE REGRESIÓN TASA DE TRANSFERENCIA DE CALOR VS. FLUJO MÁSCO DE AIRE	92
FIGURA 4.9 DISPERSIÓN Y CORRELACIÓN ENTRE FLUJO MÁSCO DE AGUA Y TASA TRANSFERENCIA DE CALOR.....	95
FIGURA 4.10 ANÁLISIS DE REGRESIÓN TASA DE TRANSFERENCIA DE CALOR VS. FLUJO MÁSCO DE AGUA	96
FIGURA 4.11 DISPERSIÓN Y CORRELACIÓN ENTRE FLUJO MÁSCO DE AGUA Y FLUJO MÁSCO DE AIRE.....	100
FIGURA 4.12 RESULTADOS ANÁLISIS REGRESIÓN PARA LA TASA GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.	101

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA	135
ANEXO 2 PROCESO DE EMSAMBLE DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	136
ANEXO 3 TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	138
ANEXO 4 FLOW MEASUREMEN	139
ANEXO 5 SENSORES DE TEMPERATURA	140
ANEXO 6 CONTROLADOR DE TEMPERATURA TCN4S	141
ANEXO 7 VARIADOR STARVERT IE5.....	142
ANEXO 8 TERMOHIGROANEMOMETRO	143
ANEXO 9 TANQUE CALENTADOR DE AGUA.....	144
ANEXO 10 WATER PUMP QB-60.....	145
ANEXO 11 MEDIDOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL	146

GLOSARIO DE TÉRMINOS

TE: Torre de enfriamiento

L`: Flujo de masa de agua por unidad de área

G`: Flujo de masa de aire por unidad de área

Lt: Litro

RPM: revoluciones por minuto

Min: minutos

S: Segundos

Kpa: Kilopascales

Pa: Pascales

Kg: Kilogramos

m: metros

mm: milímetros

in: pulgadas

ft: Pies

Cº: Grado centígrado

Cp: Calor específico del agua

KXA: Tasa de transferencia de masa

Tbh: Temperatura de bulbo húmedo

NUT: Número de unidades de transferencia

H: Entalpía del aire en un determinado punto y temperatura de operación

H`: Entalpía de saturación del aire

v: Velocidad

I: Litro

H`-H: Diferencias entre entalpías

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Situación Problemática

En determinados procesos industriales, frecuentemente se generan grandes cantidades de calor que deben ser constantemente disipadas para que las máquinas operen de forma eficiente. Se ha observado, que muchos de los intercambiadores de calor son a menudo los ríos y vertientes de agua natural, debido a que el proceso de evaporación es más efectivo y de bajo costo. Sin embargo, con la necesidad del cuidado del medio ambiente, esta forma de trabajar presenta algunos inconvenientes, puesto que estos intercambiadores naturales no tienen control o supervisión humana para sus operaciones, y las respectivas anomalías y disturbios que se pueden generar como son las variaciones atmosféricas. Así también, el impacto al medio ambiente que ocasiona el desecho de agua del proceso industrial a altas temperaturas en una fuente de agua natural, puede mermar considerablemente la flora y fauna. Por dar prioridad a los costos, se piensa que el agua caliente que pueda generar un proceso industrial (contabilizado en cientos de litros) poco incide o influye en un caudal de un río o estero de cientos de miles de litros, todavía son pocos los estudios que investigan el impacto ambiental que produce el aumento de la temperatura del agua de la corriente natural en un volumen determinado. Además, utilizar directamente el agua natural de una vertiente como refrigerante puede ocasionar un impacto negativo en los recursos hídricos, por lo tanto, es conveniente cuidar el recurso más importante que se tiene, que es el agua dulce.

La implementación e inclusión de un sistema de torres de enfriamiento da para una reutilización del agua en los intercambiadores de calor, y con ello se consigue que la cantidad de agua considerada de desecho disminuya notablemente. Además, el agua de refrigeración que se vierte en las cuencas naturales puede llegar a tener una temperatura menor, siendo menos perjudicial al ecosistema de los ríos. Un sistema de torres de enfriamiento se

puede optimizar con la utilización de un relleno adecuado, lo cual permite un control que tenga en cuenta el impacto ambiental del proceso, así mismo, sirve para normalizar de manera segura para el ambiente la cantidad de agua usada en el proceso e intercambiada con el ecosistema.

El relleno es el elemento localizado internamente en la torre, la misma puede ser de madera, metálica o plástica. La función del relleno es que el agua que atraviesa internamente se divida en gotas cada vez más pequeñas y también, que las gotas permanezcan el tiempo suficiente dentro del cuerpo de la torre. El objetivo es de garantizar una óptima transferencia de calor. Al mismo tiempo, ayuda a que el flujo de aire se distribuya de manera uniforme en el interior del cuerpo más importante en las torres de enfriamiento debido al aporte principal que es generado por la industria, y de manera igual para el aumento en su eficiencia de operación. Los problemas se profundizan con el retraso en llegar desde el exterior o insuficiencia en los mercados de los rellenos comerciales a bajo costo para las torres de enfriamiento, por ende la paralización en la instalación de la torre va aumentando el dinero gastado en la construcción y sostenimiento de dichos equipos, se tomará como opción la implementación o utilización de materiales alternativos y económicos donde se les realizará las pruebas experimentales para hallar las correlaciones pertinentes a la investigación.

En este contexto, se propone un **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON UN RELLENO ALTERNATIVO IDENTIFICANDO LAS CORRELACIONES DE LA TASA GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y CAÍDA DE PRESIÓN”**.

1.2 Formulación del Problema

Por lo anteriormente argumentado se plantea el problema bajo la siguiente interrogante:

1.2.1 Formulación del Problema General

¿Cómo se obtiene las correlaciones de tasa global de transferencia de masa y caída de presión si se diseña e implementa un prototipo de la torre de enfriamiento con un relleno alternativo?

1.2.2 Formulación de los Problemas Secundarios

- a) ¿Cómo la variación en la velocidad del aire genera un cambio en la caída de presión a través del ‘relleno alternativo’ del prototipo de ‘torre de enfriamiento’?
- b) ¿Cómo la variación en el flujo másico del aire por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del ‘relleno alternativo’ del prototipo de ‘torre de enfriamiento’?
- c) ¿Cómo la variación en el flujo másico del agua por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del ‘relleno alternativo’ del prototipo de ‘torre de enfriamiento’?
- d) ¿Cómo la variación en el flujo másico del agua y aire por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del ‘relleno alternativo’ del prototipo de ‘torre de enfriamiento’?

1.3 Justificación Teórica

La presente investigación permitió identificar correlaciones experimentales de tal forma que se logró obtener con el menor error posible valores característicos del relleno alternativo que se está estudiando y que fué de un valor económico bajo en relación con los que se importa para la industria en general.

1.4 Justificación Práctica

La presente investigación realizada aportó con la obtención de correlaciones de caída de presión y tasa global de transferencia de calor para un relleno alternativo, que fué de un material reciclado, lo cual ayuda a la conservación del medio ambiente, estos resultados obtenidos podrán ser utilizados como bases teóricas para futuras investigaciones de nuevos materiales reciclados, que servirán como rellenos sumamente económicos para torres de enfriamiento que son máquinas de mucho uso en la industria.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

El objetivo general es “obtener las correlaciones de tasa global de transferencia de masa y caída de presión si se diseña e implementa un prototipo de la torre de enfriamiento con un relleno alternativo”.

1.5.2 Objetivos Específicos

Se plantea tres objetivos específicos para el logro de la investigación.

1. Demostrar como la variación en la velocidad del aire genera un cambio en la caída de presión a través del ‘relleno alternativo’ del prototipo de ‘torre de enfriamiento’.
2. Demostrar como la variación en el flujo másico del aire por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del ‘relleno alternativo’ del prototipo de ‘torre de enfriamiento’.

3. Demostrar como la variación en el flujo másico del agua por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del 'relleno alternativo' del prototipo de 'torre de enfriamiento'.
4. Demostrar como las variaciones en el flujo másico de agua y aire por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del 'relleno alternativo' del prototipo de 'torre de enfriamiento'.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Filosófico o Epistemológico de la investigación:

Algunos escritos antiguos detallan cómo los egipcios, hindúes y otras civilizaciones, utilizaban procedimientos en la elaboración de hielo artificial, semejantes en sus principios a los que se utilizan actualmente. Se utilizaban vasijas de arcilla con porosidades o materiales similares poco hondas y llenaban con agua donde eran colocadas sobre catres de paja gruesos durante la noche. Si las condiciones atmosféricas eran propicias: frío, aire seco y una noche sin nubes, la pérdida de calor, debida a la evaporación nocturna, originaba en la superficie que se formen capas finas de hielo. La paja impedía la conducción de calor desde la tierra que estaba a una temperatura más elevada y las formas de las vasijas poco hondas y de una gran superficie, permitía la pérdida de calor y evaporación por radiación. Estos métodos de generar refrigeración artificial son apreciables ejemplos de la habilidad humana. En la historia de las máquinas térmicas y la termotecnia, se observa una innovación útil, con sentido práctico, posteriormente se sentaron los fundamentos racionales, científicos y metodológicos.

Conforme a García (2015), en la década de los años 1550, un médico español, Blas Villafranca publicó en Roma su libro titulado “*Methodes refrigerandi* del enfriamiento del agua y el vino mediante mezclas refrigerantes”, fue por primera ocasión que se usó la palabra refrigerar que denotaba el logro de mantener una temperatura menor a la del entorno (pág.1).

En la década de 1600 a 1610, se dio a conocer que se podía congelar el agua empleando una mezcla de agua con sal. Estos procesos actualmente se usan para hacer maquetas de hielo a escala industrial.

Posteriormente al año 1600, son empleadas las mezclas refrigerantes por

Robert Boyle y el físico francés Philipe Laire en las investigaciones científicas. Ya en el siglo XVIII, muchos físicos y químicos utilizaban mezclas refrigerantes en los laboratorios (Reyes, 2015, pág. 3).

A partir del año 1800, científicos como: Von Karsten (1840), Hanemann (1864), Rudorff (1869), Pfandler (1875) y Brendel (1892) investigaron y postularon las leyes que guían las mezclas frigoríficas, las mezclas de hielo y sal común que permiten disminuir la temperatura hasta -20°C , los resultados de estos estudios se utilizaron constantemente para la congelación de alimentos. Emilio Carbonell en 1904 y José Gres en 1912, inscribieron patentes en España sobre mezclas refrigerantes para la conservación de alimentos en general (Reyes, 2015, pág. 3).

Pero la mejora se produjo recién en los años posteriores a 1900, un señor de Nueva York tenía que combatir en su imprenta con los cambios bruscos de temperatura y de humedad cuando se estaban ejecutando los procesos de impresión. Las variaciones incidían levemente en los tamaños del papel, lo que no permitía alinear las tintas y perjudicando las impresiones a color. Esto motivó a que Willis Carrier, recién graduado de la Universidad de Cornell, investigó cómo solucionar el problema de la alta humidificación en el aire que era enfriado. Es así, que en 1902, diseñó una máquina que regulaba la humedad y la temperatura a través de tubos enfriados, siendo esto, en el primer equipo de climatización en el mundo. El equipo para refrigerar el aire fue patentado, se le dio una solución al señor de la imprenta, quien enhorabuena fue muy feliz, se disminuyeron los inconvenientes en su trabajo (Cabezas, 2011).

De acuerdo a Cabezas (2011), Willis Carrier en 1915 y seis amigos ingenieros, crearon la “Compañía de Ingeniería Carrier”, conocida mundialmente conocida como “Carrier”, para la innovación y desarrollo de su producto. El negocio en esa época solamente se dedicó al control de humedad y temperatura de la producción industrial, entre estas estaban empresas de películas, fábricas tabacaleras, fábricas de carne procesada, empresas farmacéuticas que elaboraban cápsulas medicinales, entre otras. La calidad

de los productos se mejoró notablemente.

Cabe resaltar que Carrier patentó el equipo como “Un aparato para tratar el aire” (Córdova, 2009, pág. 19).

Carrier, en el año 1921, creó la “Máquina de Refrigeración Centrífuga” y la patentó, convirtiéndose en el primer sistema para acondicionar el aire en lugares espaciosos. Las máquinas anteriores funcionaban con pistones que bombeaban a través del circuito refrigerante. En estas nuevas máquinas se implementó un compresor centrífugo que hacía a las máquinas más seguras y a su vez más eficaces, las anteriores máquinas funcionaban con pistones que bombeaban a lo largo del circuito de refrigeración (Cabezas, 2011).

Este nuevo sistema tuvo su estreno en 1924 en el almacén departamental Hudson (ciudad de Detroit), en el cual, la ventilación del aire de su popular ‘venta de sótano’ tenía problemas porque los clientes terminaban mareados y hasta con vómito, por la pésima circulación de aire renovado (lleno de gases provenientes de los seres humanos, humedad, malos olores, entre otros). Tuvo un éxito increíble, se instaló equipos similares en la sala de cines, hoteles, hospitales, oficinas, aeropuertos, entre otros. Existía un deleite por asistir a las instituciones, con un clima moderado y un aire acondicionado, es decir, se trató el aire para el agrado de las personas (Cabezas, 2011).

Para uso doméstico, las Industrias Carrier recién en 1928, desarrollaron el primer equipo de acondicionador de aire para los hogares norteamericanos, la Gran Depresión de 1929 en los EEUU fue un obstáculo pero la masificación, la demanda obviamente se redujo notablemente. Después de la Guerra (1945), los ingresos por ventas de los aparatos y sistemas para tratar el aire para uso doméstico (casas y departamentos) fueron un éxito. Lo que se podía observar era un bienestar general y mejoras en la calidad de vida producto de mejorar las condiciones del clima en los espacios cerrados (Cabezas, 2011).

Es justo asentar que este episteme o conocimiento es de una practicidad extraordinaria, crea ambientes agradables, motivan al trabajo (higiene del

trabajo), aumenta la capacidad del ser humano ya sea en tareas físicas o mentales (estudios han demostrado un mayor rendimiento físico e intelectual con temperaturas entre 20º a 25º centígrados), entre otros aspectos. La revolución en la industria ya había comenzado, especialmente con la aplicación de torres de enfriamiento (TE, abreviado para futuros escritos) en sus diferentes modelos y múltiples aplicaciones.

En el contexto de lo señalado anteriormente, las TE tienen infinidad de aplicaciones tales como enfriamiento de agua para usos en procesos industriales, enfriamiento del agua de condensación usada en instalaciones frigoríficas (comerciales, industriales, de hostelería, acondicionamiento de aire industrial, de bienestar en la edificación, etc). Por esto, el motivo de la presente investigación se basará en el método experimental. Para complementar la idea se indica que “los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes) en una situación de control” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, pág. 129).

Para explicar como se aborda el conocimiento o episteme de los tratamientos refrigerantes, se indica lo siguiente sobre el propósito del método experimental: “Es investigar las posibles relaciones causa-efecto, exponiendo a uno o más grupos experimentales a acción de dos o más condiciones de tratamiento, comparando los resultados con uno o más grupos de control que no reciben tratamiento” (Ávila, 2001). Consecuente al tema, Ávila menciona otro concepto de método experimental, pero esta vez teniendo en cuenta a Mario Bunge. Así, indica: “El método experimental consiste en someter a un sistema material a ciertos estímulos y en observar su reacción a estos, para resolver algún problema sobre la relación estímulo-respuesta” (Bunge, 1959).

Hay que mencionar, además, lo explicado por Bunge, quien afirma: “La ciencia fáctica emplea el método experimental concebido en un sentido amplio. Este método consiste en el test empírico de conclusiones particulares extraídas de hipótesis generales” (Bunge, 1959, p. 16). Y asegura también

que: “La experimentación involucra la modificación deliberada de algunos factores, es decir, la sujeción del objeto de experimentación a estímulos controlados” (Bunge, 1959, p. 35).

El método experimental se caracteriza por el control de las variables, por lo tanto, las variables son propiedades, atributos o características de los objetos o hechos de estudio como ejemplo: actitudes, sexo, edad, escolaridad, entre otros (Briones, 2001).

Para abordar el problema del conocimiento y la ‘posibilidad de conocer’, se establece que las corrientes epistemológicas que están de acorde son: el ‘dogmatismo’ (si es posible conocer), el ‘relativismo’ (el conocimiento y la verdad dependerá de la época y del lugar) y el ‘pragmatismo’ (el conocimiento y la verdad dependerá de su utilidad. En estos aspectos, también se está de acuerdo con lo afirmado por Thomas Kuhn, quien en su libro titulado “Estructura de las Revoluciones Científicas” afirmaba que: “La naturaleza misma de la investigación normal asegura que la innovación no será suprimida durante mucho tiempo” (Kuhn, 1971, pág. 27). En este sentido, sintetizando a Kuhn, afirma Bernal (2006), “según Kuhn, el patrón de desarrollo de una ciencia es el cambio o la transición sucesivas de un paradigma a otro”. Es decir, que la comunidad científica continuamente está trabajando en un paradigma alternativo. Este es el caso de los sistemas de enfriamiento o tratamientos del aire o las torres de enfriamiento, cuyos conocimientos están dentro de las ciencias aplicadas, pues tratan de resolver problemas prácticos y continuamente se presenta nuevos paradigmas que mejoran el concepto de los sistemas de refrigeración o enfriamiento.

Siguiendo con la forma de abordar el conocimiento o episteme y en su aspecto ‘el origen del conocimiento’ en esta investigación, la corriente epistemológica es el ‘empirismo’, pues indica que el conocimiento se origina en la experiencia. Muchos de los avances en los sistemas de enfriamiento se basaron en las experiencias ancestrales, luego cálculos científicos, que los llevaban a experimentar nuevas técnicas, muchas de las cuales tuvieron resultados acertados. Estos conceptos se innovan constantemente en

aspectos adyacentes como son los materiales de construcción, puesto que mejoran o crean nuevos materiales que ofrecen mejores resistencias y aumentan la eficacia y eficiencia de los sistemas. En las ciencias aplicadas, el conocimiento está al servicio de la sociedad.

Por otra parte, por ‘la esencia del conocimiento’, la corriente epistemológica que se adecúa es el ‘fenomenalismo’ puesto que indica que el conocimiento necesita tanto lo mental como lo real. En ese sentido, el concepto de tratar el aire o agua, está en la mente de las personas, se convierte en una necesidad para la sociedad, lo real es que las personas decaen en sus actividades con temperaturas inadecuadas, los procesos industriales decaen en su productividad. Ante estos fenómenos se presentan las alternativas propias de la invención del hombre.

2.2 Antecedentes de Investigación

Existen algunas tesis que sirven como antecedentes para el presente trabajo de investigación que se mencionan a continuación:

“Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental” (Villa, 2008).

Análisis del Desempeño de una Torre de Enfriamiento a Escala de Laboratorio para Diversos Materiales de Empaque, Temperatura de Entrada de Agua y Relación de másica de Flujo Agua – Aire (Obregón, Pertuz, & Domínguez, 2017)

Diseño operacional de una torre de enfriamiento adiabática de agua de tiro mecánico inducido contracorriente a escala de laboratorio (Restrepo, 2011).

Prestaciones termo-electro-fluidodinámicas de una torre de enfriamiento de agua de tiro forzado (Alamo & Fernandez, 2014).

Cálculo y selección de las torres de enfriamiento de la Empresa Siderúrgica” José Martí (Díaz, 2016).

2.3 Bases Teóricas

2.3.1 Torres de enfriamiento

Se tiene las siguientes definiciones que explican el objetivo de estudio: “Una torre de enfriamiento es una máquina térmica utilizada para enfriar agua, mediante la evaporación de un pequeño porcentaje de la misma agua que se enfría (enfriamiento evaporativo)” (Glaciar Ingeniería, 2015). Así también, se tiene la siguiente: “Se trata de dispositivos semiabiertos, diseñados para enfriar el agua mediante su evaporación en contacto con el aire ambiente” (Mor Fernández, 2004, pág. 13).

Las TE son equipos mecánicos cuyo propósito es el de “enfriar masas de agua en procesos que requieren una disipación de calor, el principio de enfriamiento de dichos equipos se fundamenta en la evaporación” (Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social [MSCBS], 2004, pág. 1). El sistema produce gotas de agua que se pulverizan por lo general por caída libre al ponerse en contacto con una corriente de aire, el enfriamiento de esta agua enfría al resto que cae en el relleno (que puede ser de plástico u otro material). Cabe recalcar lo siguiente: “La cantidad de calor extraído para enfriar el agua depende de las condiciones climáticas del sitio de operación (altura sobre el nivel del mar, temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo)” (Glaciar Ingeniería, 2015).

Es común que estos equipos sean complementarios a los procesos de refrigeración o sistemas de climatización para generar frío en hospitales, hoteles, bancos, en otras palabras, en edificaciones en general. Así también, en las industrias que necesitan intercambiadores de calor, o sistemas de

enfriamiento para las maquinarias en general. Es frecuente observar estas torres en las centrales termoeléctricas, para la disipación del calor residual. En la (Figura 2.1) podemos observar una torre de enfriamiento que su aplicación está orientada a generar frío para ser utilizada en un edificio.

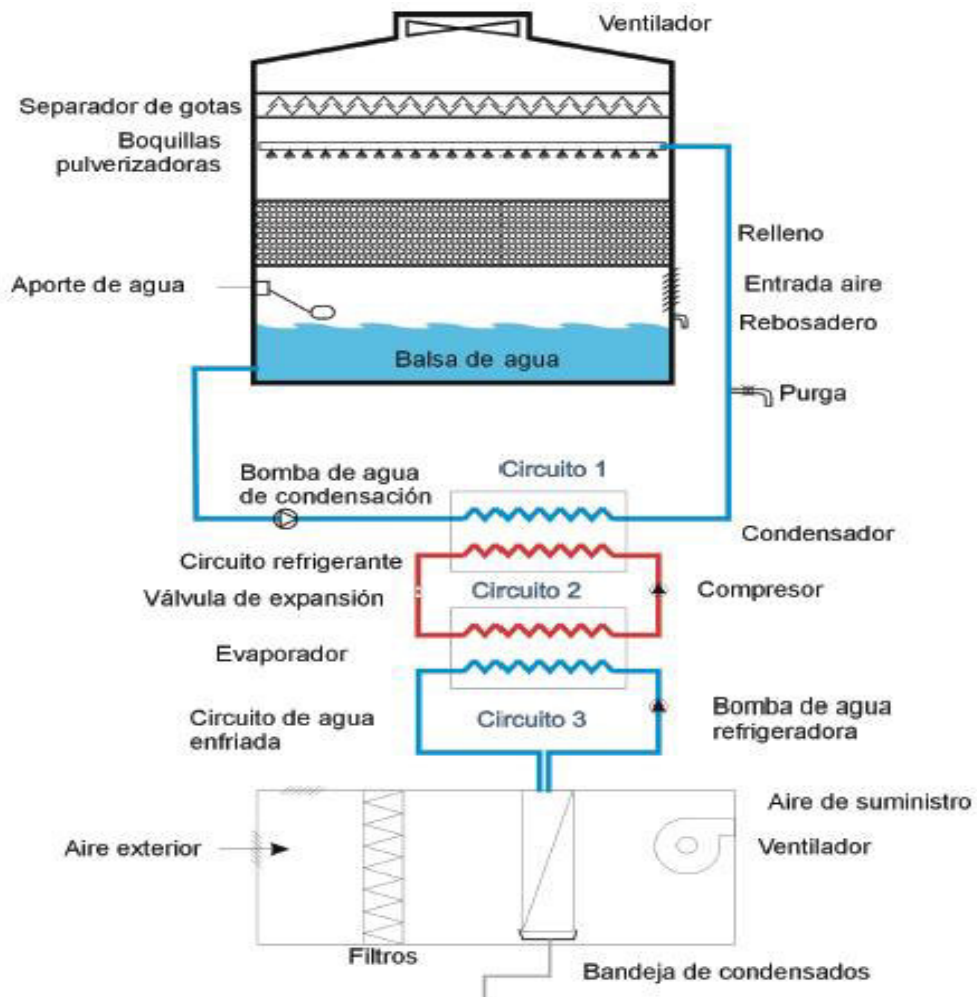


Figura 2.1 Torre de enfriamiento

Fuente. Página web: <http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>

(Climayoreo, 2019)

2.3.2 Clasificación de las torres de enfriamiento

Hay equipos de diversas dimensiones y estructuras según la carga térmica a disipar, el fabricante, los materiales, etc., se podría catalogar las torres de refrigeración en dos grandes grupos:

- Torres de enfriamiento de tiro natural.

- Torres de enfriamiento con ventilación mecánica.

2.3.2.1 Torres de enfriamiento de ‘ tiro natural’.

Existen algunas clases de equipos de ‘ tiro natural’, entre los cuales tenemos:

2.3.2.1.1 Torres de enfriamiento basados en efecto chimenea de tiro natural.

En los que el agua pulverizada produce un punto caliente en la sección baja de la torre de enfriamiento e induce el movimiento ascendente del aire habitualmente en contracorriente (Figura 2.2).

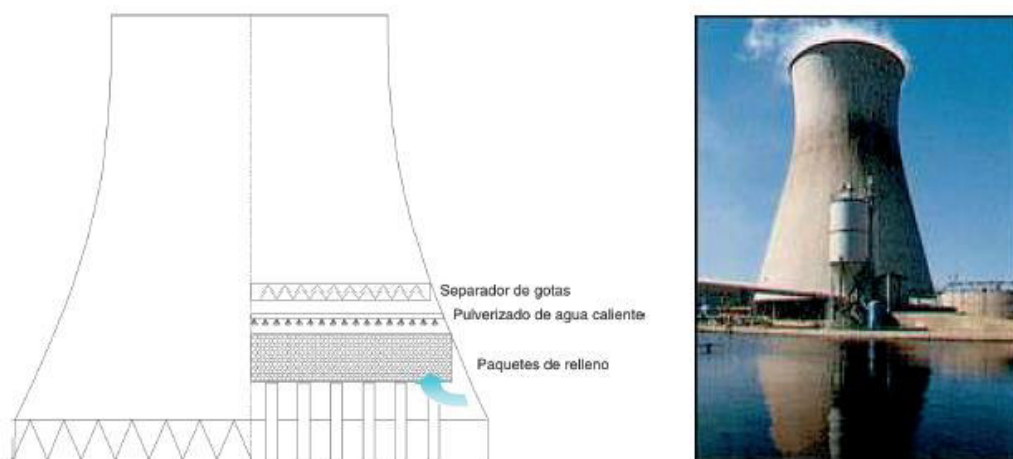


Figura 2.2 Torre de enfriamiento de tiro natural

Fuente. Página web: <http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>

(Climayoreo, 2019)

Estas TE son utilizadas normalmente en las centrales de producción de energía eléctrica, que pueden ser nucleares o térmicas; así también, en las industrias de gran envergadura donde intervienen procesos químicos, en general, estos procesos exigen refrigerar y mover cantidades grandes de agua. En estas instalaciones normalmente no se disponen de separadores de gotas, no es necesario por la pérdida elevada de carga que ocasionan estos complementos puesto que disminuyen exageradamente el flujo de aire. Por esta razón, por su geometría y elevada altura y geometría, la emisión de aerosoles es escasa (MSCBS, 2004, págs. 3-4).

2.3.2.2 Torres de enfriamiento con ventilación mecánica

2.3.2.2.1 Torres de enfriamiento de tiro forzado

Las TE dispuestos con una ventilación mecánica llamados también de ‘tiro forzado’, contienen ventiladores (frecuentemente son de tipo centrífugo, a excepción en aquellos sistemas que comunmente son de tipo axial), localizados en la parte inferior de la TE. De esta manera, impulsan el aire a la parte interna, aumentando la presión e impulsa de esta forma su salida por la parte superior por medio del relleno (MSCBS, 2004, págs. 4-5). El bosquejo y una imagen del equipo se puede observar en la (Figura 2.3).

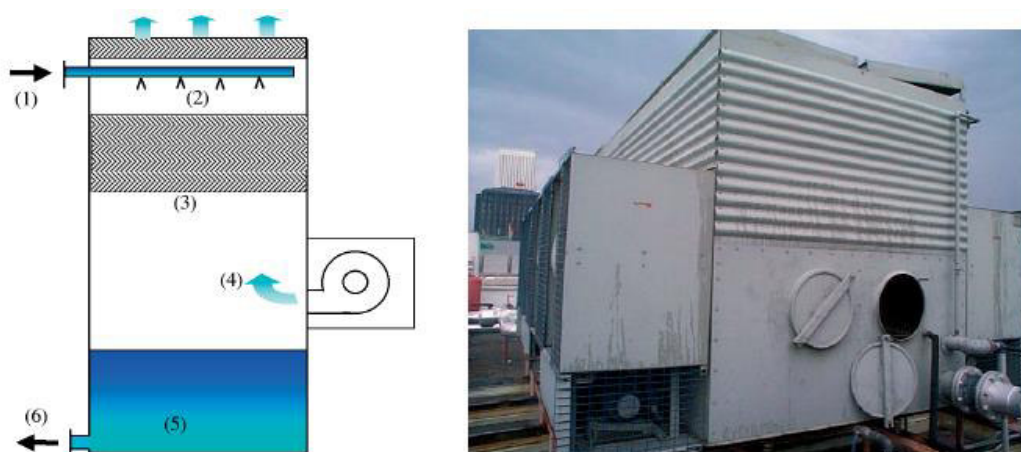


Figura 2.3 Torre de enfriamiento de tiro forzado

Fuente. Página web: <http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>

(Climayoreo, 2019)

Primeramente, el agua de retorno se pulveriza en la parte superior de la torre de enfriamiento (1); luego, pasa por el relleno (2); se indica que el propósito es aumentar el tiempo de contacto con el aire que asciende a través del ventilador (3); se distingue el único punto de entrada de aire que se realiza a través del ventilador (4); es en esta parte donde se enfría el agua, la cual cae en la balsa de la torre (5); finalmente, a través de bombas se reinicia nuevamente el proceso de intercambio de calor (6) (MSCBS, 2004, pág. 5).

2.3.2.2.2 Torres de enfriamiento de 'tiro inducido'

A diferencia de los anteriores, las TE de 'tiro inducido' funcionan en depresión, esto quiere decir, que el ventilador, ubicado arriba de la torre, extrae aire del interior. La misma que recircula por medio de orificios ubicados en la parte inferior (MSCBS, 2004, pág. 5). Se indica el bosquejo de trabajo en la (Figura 2.4).

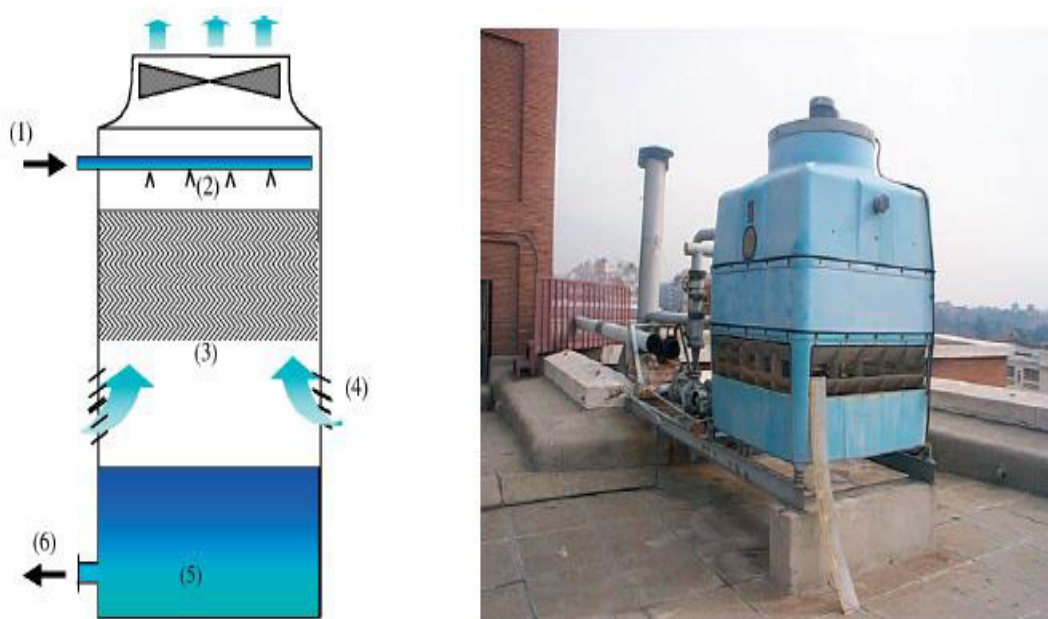


Figura 2.4 Torre de enfriamiento de tiro inducido

Fuente. Página web: <http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>

(Climayoreo, 2019)

El agua de retorno procedente del punto de uso (1) es pulverizada por la parte superior de la torre (2) pasando a través del relleno (3), cuya misión es incrementar el tiempo de retención y por tanto el contacto con el aire ascendente (4) cuya zona de entrada es a través de las aperturas laterales. En el relleno se produce el enfriamiento, quedando el agua refrigerada en la balsa de la torre (5) que se impulsa (6) por medio de equipos de bombeo para reiniciar el ciclo de intercambio de calor en el punto de uso. (Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social [MSCBS], 2004, pág. 5)

2.3.2.3 Condensadores evaporativos / Torres a circuito cerrado

Sobre estos tipos de condensadores. un tratado de torres de enfriamiento (estudio que trata sobre la instalación, mantenimiento y programas de prevención de la salud por la presencia de la bacterias y bacilos agrupadas como ‘legionellas’) dado por el ‘Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social del Gobierno de España’ afirma que son “equipos en los que el relleno se sustituye por un serpentín que realiza la condensación directa del gas refrigerante en el caso de condensador evaporativo y actúa de intercambiador de calor en el caso de una torre a circuito cerrado” (MSCBS, 2004, p.6). En la (Figura 2.5) se observa un *layout* de un equipo con estas características.

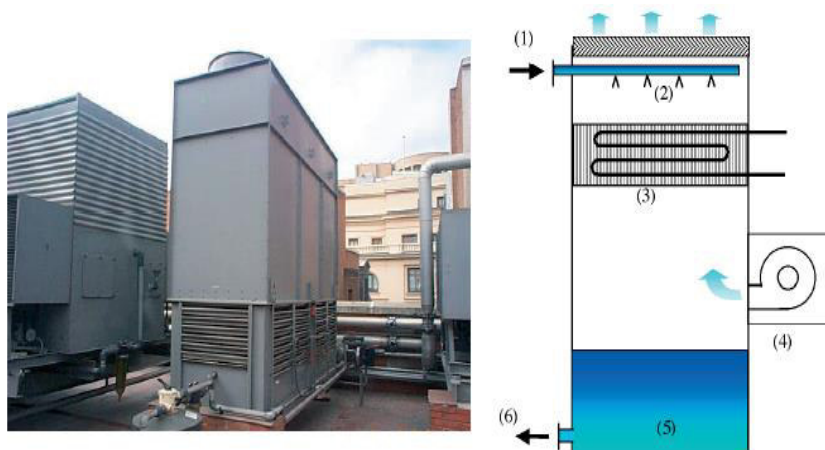


Figura 2.5 Torre de enfriamiento a circuito cerrado

Fuente. Página web: <http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>

(Climayoreo, 2019)

El agua (1) se pulveriza desde la parte superior del condensador/ torre a circuito cerrado (2) sobre el serpentín (condensador o intercambiador de calor) (3), en cuyo interior se condensa el refrigerante o se realiza el intercambio de calor. El aire se introduce sólo a través del ventilador (4). El agua de balsa de la torre (5) se impulsa (6) por medio de equipos de bombeo para reiniciar el ciclo (1). (MSCBS, 2004, p.7)

2.3.2.4 Equipos mixtos

Sobre estos equipos, afirma el MSCBS (2004), “disponen de un sistema de doble batería de condensación, se llaman mixtos porque pueden funcionar

como condensadores por aire en las épocas frías y como condensadores evaporativos en épocas cálidas” (pág. 6). Se puede observar en la (Figura 2.6) el tipo de instalación y su esquema de funcionamiento. Son muy efectivos para épocas cálidas porque disminuyen la visibilidad de emisión de gotas y lo excluyen en modo condensación por aire. La desventaja son sus altos costos de inversión.

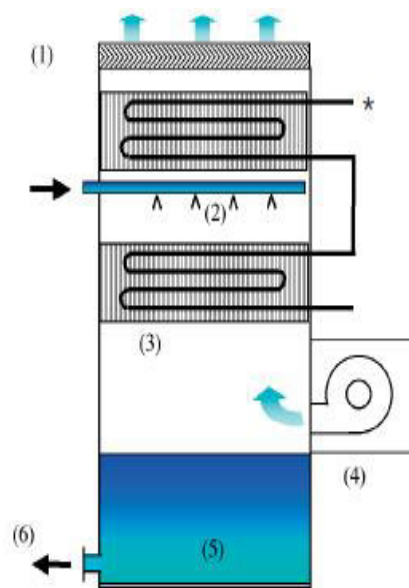


Figura 2.6 Torre de enfriamiento mixta

Fuente. Página web: <http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>

(Climayoreo, 2019)

El agua (1) se pulveriza desde la parte superior de la torre (2) entre dos serpentines (intercambiador de calor) (3), en cuyo interior se condensa el refrigerante. El aire se introduce sólo a través del ventilador (4). El agua de balsa de la torre (5) se impulsa (6) por medio de equipos de bombeo para reiniciar el ciclo (1). El sistema puede operar sin pulverización de agua como sistema condensador por aire cuando las condiciones ambientales lo permiten. (MSCBS, 2004, p.7)

2.3.2.5 Clasificación de las torres de enfriamiento ‘en función de la forma en que el aire atraviesa el relleno’

- Flujo en contracorriente: El aire atraviesa de abajo a arriba el relleno de

la torre.

- Flujo cruzado: El aire atraviesa de forma lateral el relleno de la torre.

Se presentan las clases de torres de enfriamiento de acuerdo a la forma de los flujos de agua y aire (Figura 2.7).



Figura 2.7 Tipos de torres de enfriamiento

Fuente. Página web: <http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>

(Climayoreo, 2019)

2.3.3 Rellenos de torres de enfriamiento (TE)

Conforme a Sirena, Galeasso y Najle (2010), “el relleno en una torre de enfriamiento es el elemento a través del cual pasa el agua y tiene el objetivo de aumentar la eficacia general de la transferencia de calor de la torre por unidad de volumen de la misma” (p.26). Este beneficio se obtiene incrementando el área de contacto entre el aire y el líquido, y retrasando el flujo del agua a través del interior de la TE. Existen dos formas de incrementar el área de contacto, la primera es dividiendo el agua en gotitas y la segunda esparciendo una capa de agua sobre más áreas. Estas maneras de ejecutar los procesos proveen la consiguiente tipología:

- Rellenos de salpicado o goteo.

- Rellenos de película
- Rellenos mixtos

Los rellenos de salpicado son generalmente barras o listones prismáticos o cilíndricos, colocados transversalmente en la vía donde cae el agua. Estos listones están distribuidos de algunas formas, como se observa en la (Figura 2.8), pero, deben estar colocados de tal manera que sea obligatorio que las gotas golpeen con una velocidad tal a los listones inferiores, suficiente para provocar la atomización de las gotas (Sirena et al, 2010, p.26).

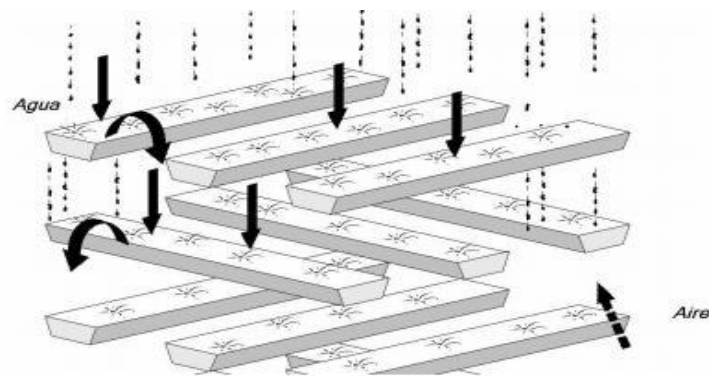


Figura 2.8 Forma básica de relleno por salpicado

Fuente. (Sirena, Galeasso, & Najle, 2010) '*Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 14*'

En la actualidad, se han desarrollado rellenos con complejas formas geométricas, sin embargo, el principio es el mismo. (Figura 2.9)

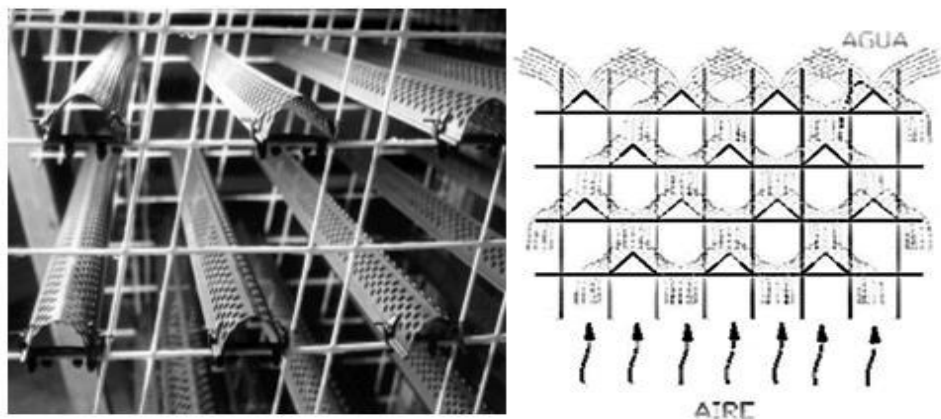


Figura 2.9 Relleno de salpicado de formas geométricas complejas

Fuente. (Ramírez & Villarreal, 2008, pág. 26).

“El relleno de película tiene una alta relación de superficie mojada por unidad de volumen. La forma básica es de placas planas u onduladas dispuestas en paralelo y cercanas entre sí, en la misma dirección del flujo de agua” (Sirena et al, 2010, p.26). El objetivo principal de este tipo de relleno es hacer que el agua descendida se adhiera a las dos caras de cada placa, de esta forma, se crea una mayor área de transferencia de masa y calor. Como se observa en la (Figura 2.10), estos rellenos procuran diseñar torres más compactas.

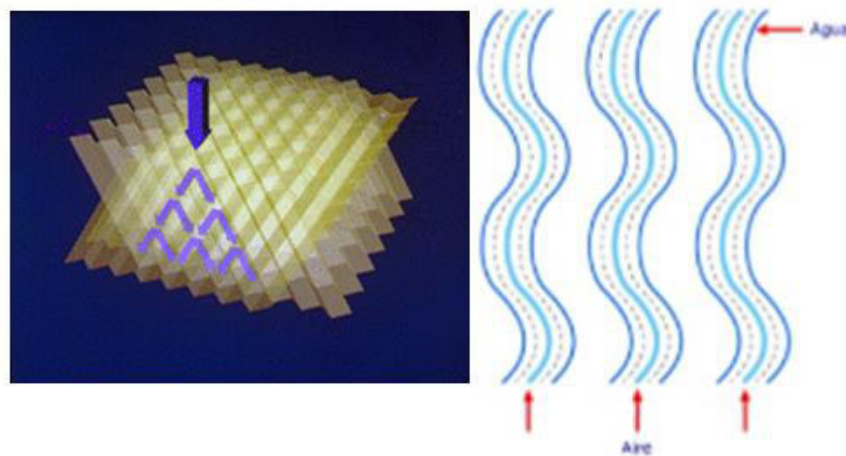


Figura 2.10 Relleno de película

Fuente. Página web: <http://torresderefrigeracion.org/> (EWK Torres de Refrigeración, 2016)

El relleno mixto fue desarrollado, según Negre (2019), “para enfriar aguas muy cargadas de partículas sólidas que podrían llegar a obturar un relleno laminar. La suciedad es fácilmente arrastrada por la misma agua a enfriar y el relleno permanece limpio, consiguiéndose un rendimiento superior al relleno de goteo” (p.1). En la (Figura 2.11) se observa las características.

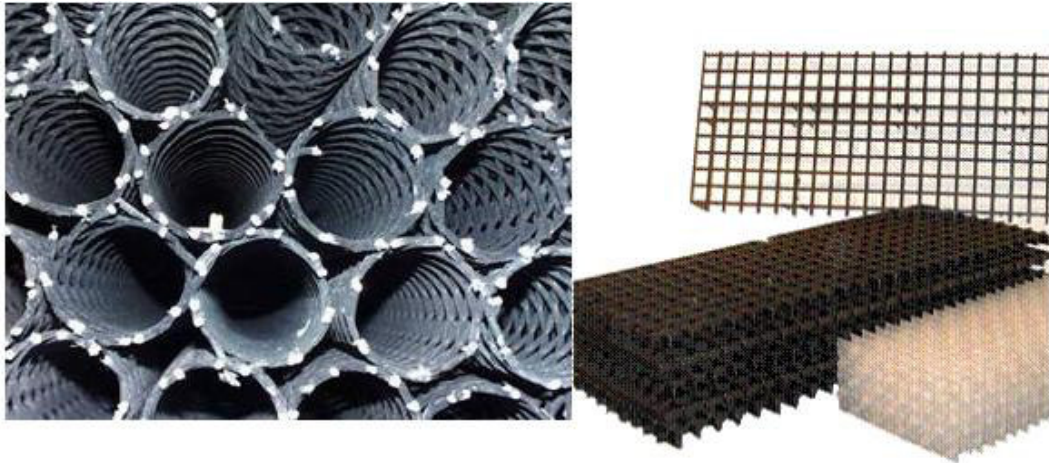


Figura 2.11 Relleno mixto

Fuente. Página web: <http://torresderefrigeracion.org/> (EWK Torres de Refrigeración, 2016)

2.3.3.1 Ecuación característica para los rellenos

En los últimos años, con el objetivo de optimizar el desempeño de las TE, se han realizado estudios experimentales en cuanto a los parámetros que tienen más incidencia en la transferencia de calor y masa, en especial el tipo de relleno (Obregón, Pertuz, & Domínguez, 2017). En la revisión de trabajos similares, Sherwood y Simpson investigaron la eficacia de una TE de tiro mecánico usando rellenos de tabloncillos de madera. Por otra parte, Swenson y Kelly investigaron los aspectos claves que debe tener un relleno de tipo malla, correlacionando el flujo agua-aire con el cambio en la geometría del relleno y la temperatura. Así mismo, entre los hallazgos, tuvieron un valor de la relación “ L'/G' ” donde las propiedades de la TE, se independizaban del flujo de aire y de la temperatura de bulbo húmedo. Bedekar y otros, realizaron experimentos con rellenos pelliculares, dieron sus resultados en función de las características de la TE como la temperatura a la que sale el agua y la eficiencia en términos de la relación de flujo “ L'/G' ”. Las correlaciones experimentales de los coeficientes de transferencia de calor y masa ($K_y a$) se observan en algunos formatos en varias investigaciones (Obregón et al., 2017, p.43).

En el mismo sentido, Lowe estipuló la correlación como se observa en la ecuación (2.1), por otro lado que Kröger y Kloppers presentaron la ecuación (2.2):

$$K_{ya} = c_1 * (L'/G')^{c_2} \quad (2.1)$$

$$K_{ya} = c_1 * L'^{c_2} G'^{c_3} \quad (2.2)$$

En otras investigaciones Kröger y Kloppers observaron que el coeficiente de transferencia K_{ya} dependía también de la altura del relleno, y del cambio de la temperatura de entrada, proponiendo una manera diferente de correlacionar, presentando una nueva ecuación (2.3).

$$K_{ya} = c_1 * L'^{c_2} G'^{c_3} Z^{c_4} T_1^{c_5} \quad (2.3)$$

En esta ecuación, los valores de c son constantes en las relaciones empíricas de las distintas clases de relleno.

No obstante, aunque se tome en cuenta siempre la importancia de los resultados, estos han sido muy específicos con respecto a la clase de material del relleno, por esta razón, en el presente estudio de investigación se construyó una TE a escala, para ser utilizada en el laboratorio de termofluidos y se empleó un relleno de tipo película de material reciclado. Este material reciclado se dimensionó de acuerdo con las variables de diseño. Se realizó el experimento con los parámetros encontrados en el trabajo de Mohiuddin A.K.M (como se citó en Obregón et al, 2017, p.43) y utilizados por Obregon et al (2017). Los objetivos planteados son similares a la presente investigación. El trabajo de Obregón et al, fue: “el estudio del comportamiento de los coeficientes de transferencia de masa y de calor relacionados a los procesos de humidificación para diferentes factores de material del empaque, la relación L'/G' y la temperatura de entrada del líquido” (Obregón et al, 2017, pág. 43). De esta manera, servirá para determinar su incidencia en la eficiencia del sistema y mejora la combinación de parámetros que admitan una alta transferencia de masa y calor.

Es dable utilizar ecuaciones empíricas como la siguiente (2.4), que determina la altura de empaque al usar el parámetro $K_{ya}V/L$ y el método de Merkel (como se citó en Obregón et al, 2017, p.44) con diferentes valores constantes para cada clase de relleno.

$$K_{ya}V/L = 0.07 + A(ND)(L'/G')^{-p} \quad (2.4)$$

Según Obregón et al (2017) “A y p son parámetros constantes (...), L'/G' es la relación de flujos másicos del agua y aire, ND es el número de pisos de la torre, H es la altura del empaque y VDS, el espaciado entre pisos del relleno” (p.44). De igual manera, tomando como referencia los trabajos de Obregón et al, se hizo el diseño de la torre de enfriamiento a escala de laboratorio, conservando los parámetros de las investigaciones consultadas.

Como se lo menciono antes utilizaremos para nuestro relleno de película la siguiente expresión:

$$K_{ya} = c_1 * L'^{c_2} G'^{c_3} \quad (2.5)$$

Que para nuestro estudio será: $K_{ya} = m * (\text{magua}/\text{área})^{c_2} (\text{maire}/\text{área})^{c_3}$

Donde:

m, c_2, c_3 = son constantes que dependen del tipo de relleno

$\text{magua}/\text{área}$ = es el ‘flujo másico de agua por unidad de área’. (Kg/sm^2)

$\text{maire}/\text{área}$ = es el ‘flujo de aire por unidad de área’. (Kg/sm^2)

K_y = es la ‘tasa de transferencia de masa’ en TE

a = es el ‘área de contacto del agua con el relleno’.

2.3.4 Fundamentos termodinámicos

Para proceder a diseñar una TE se debe tomar en cuenta los procesos que intervienen en su funcionamiento, vale que estos procesos sean clasificados en 2 partes: procesos fluido dinámicos y procesos termodinámicos de transferencia de calor.

Los procesos termodinámicos de transferencia de masa y calor son los que se desarrollan en el interior de la TE y los procesos fluido dinámicos que son aquellos referentes a los flujos de agua y aire, cada flujo con sus pérdidas debido a la resistencia y evaporación en el relleno de la TE.

En una TE el agua caliente que ingresa se enfría por medio del contacto directo con un flujo de aire que se encuentra a una temperatura inferior a la del agua caliente, el proceso de enfriamiento empieza parcialmente por la transferencia de calor sensible del agua al aire y por partes por la evaporación del agua hacia el flujo de aire, el calor latente del agua es tan elevada que un poco cantidad de evaporación crea elevados efectos de enfriamiento, no obstante, ya que la velocidad de transferencia de masa es pequeña, proporcionalmente el nivel de temperatura es igualmente pequeña, bajo condiciones atmosféricas normales, el calor perdido por evaporación es aproximado al 80% del calor total transferido.

En nuestra TE cuando es requerido el intercambio de calor entre el agua al aire, en este momento, la masa y el calor se transfieren a la fase gaseosa. De esta forma, la convención de signos de acuerdo a (Figura 2.12) que muestra nuestra TE, se utilizará para nuestros cálculos como positiva cuando tienen la dirección indicada, sobre lo expuesto anteriormente para nuestra TE de sección transversal constante, realizando un balance global de masa tenemos:

$$\dot{m}_{\text{agua1}} - \dot{m}_{\text{agua2}} = \dot{m}_{\text{aire1}} - \dot{m}_{\text{aire2}} \quad (2.6)$$

El respectivo balance de energía nos da como resultado:

$$H_{\text{agua2}} \dot{m}_{\text{agua2}} + H_{\text{aire1}} \dot{m}_{\text{aire1}} = H_{\text{agua1}} \dot{m}_{\text{agua1}} + H_{\text{aire2}} \dot{m}_{\text{aire2}}$$

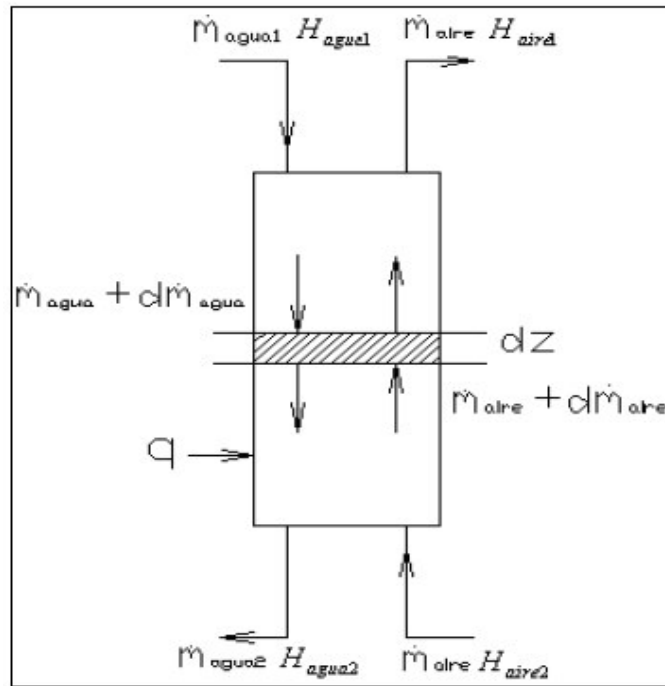


Figura 2.12 'Balance de energía en el interior de una torre de enfriamiento'

Fuente. Datos tomados de (Villa, 2008, p. 2).

Frecuentemente la columna funciona sin pérdidas de energía en el relleno, haciendo que funcione adiabáticamente. El área se localiza apartada de la pared, además la aproximación a la operación adiabática será mayor a razón de que el área transversal de la TE sea mayor, se indica las entalpías de la fase líquida de esta forma:

$$H_{agua2} = C_{p_{agua}} (T_{agua2} - T_{referencial}) \quad (2.7)$$

$$H_{agua1} = C_{p_{agua}} (T_{agua1} - T_{referencial}) \quad (2.8)$$

Donde $T_{referencial}$ es una temperatura de referencia

De acuerdo a estudios experimentales realizados por algunos autores, las mermas de agua debidas al líquido evaporado hacia el aire y tomando en cuenta que el aire sale de la TE, su humedad absoluta se ha incrementado provocado a la saturación interna en el relleno. Estas pérdidas representan menos del 5%, por lo cual se puede indicar lo siguiente:

$$\dot{m}_{agua1} \approx \dot{m}_{agua2} = \dot{m}_{agua}$$

Reemplazando en las ecuaciones anteriores tenemos lo siguiente:

$$\dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} (T_{agua2} - T_{agua1}) = \dot{m}_{aire} (H_{aire2} - H_{aire1}) \quad (2.9)$$

Despejando:

$$\frac{\dot{m}_{agua} C_{p_{agua}}}{\dot{m}_{aire}} = \frac{(H_{aire2} - H_{aire1})}{(T_{agua2} - T_{agua1})} \quad (2.10)$$

La ecuación anterior explica la pendiente que hay en la relación H_{aire} vs T_{agua} (Figura 2.13), conforme a Villa (2008), “esta curva es la línea de operación de una TE, la línea recta de H_{aire} vs T_{agua} puede determinarse conociendo las proporciones del flujo de la fase líquida y de la fase del gas, y las condiciones de ambos flujos másicos” (p.3). La recta explica la trayectoria de la fase completa conforme el fluido atraviesa el relleno de la TE.

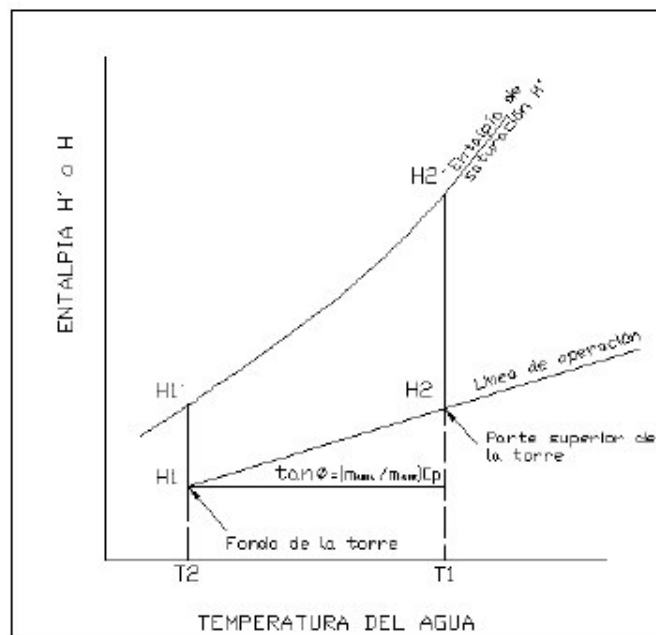


Figura 2.13 Gráfica de operación de una torre de enfriamiento

Fuente. Datos tomados de (Villa, 2008).

La pendiente de esta curva es:

$$\frac{\dot{m}_{agua} C_p}{\dot{m}_{aire}} = \frac{dH_{aire}}{dT_{aire}} \quad (2.11)$$

En una TE se encuentran dos maneras de transferencia de calor, una por

convección y otra por difusión de masa, las dos pasan del agua al aire, es decir:

$$Q = Q_c + Q_d$$

Donde Q_d determina la transferencia de calor por difusión y Q_c determina la transferencia de calor por convección, y además, lugar en que el área de operación es el área de la sección transversal del relleno en la TE y no la superficie que se forma en el volumen del relleno, área en la que se obtiene la transferencia de calor. De acuerdo a Villa (2008), “la difusión se caracteriza por el movimiento de un material entre dos fases debido a una diferencia de concentración, a este proceso también se lo conoce como transferencia de masa” (p.3).

De la ecuación (2.10)

$$\frac{\dot{m}_{agua} C_{p_{agua}}}{\dot{m}_{aire}} = \frac{(H_{aire2} - H_{aire1})}{(T_{agua2} - T_{agua1})}$$

También se la puede expresar en forma diferencial de la siguiente manera:

$$\frac{\dot{m}_{agua} C_{p_{agua}}}{\dot{m}_{aire}} = \frac{(dH_{aire})}{(dT_{agua})} \quad (2.12)$$

En esta expresión, afirma Villa (2008), “el único valor que es constante es el flujo de aire por unidad de área ya que el flujo de agua tiene una variación por consecuencia de la evaporación de este fluido” (p.3). Las mermas son producidas porque el aire seco se satura al atravesar la parte interna del TE. En la parte interna hay una lluvia de gotas de agua que van en dirección contraria a la del aire, sin embargo, estas mermas representan solamente el cinco por ciento del agua que atraviesa por el interior del relleno.

Donald Q. Kern, en su libro ‘Procesos de Transferencia de Calor’, hace un análisis desmenuzado de la derivación de las ecuaciones termodinámicas y de transferencia de calor (Kern, 1999). Las ecuaciones que se obtuvieron y que se utilizaron son las siguientes:

$$\dot{m}_{agua} C_p dT_{agua} = \dot{m}_{aire} dH_{aire} = Kx (H' - H) adV \quad (2.13)$$

Como:

$$dV = AdZ \quad (2.14)$$

Entonces:

$$\dot{m}_{aire} dH_{aire} = Kxa (H' - H) AdZ \quad (2.15)$$

La ecuación 2.15, afirma Villa (2008), “es la clave para el cálculo del diseño y el análisis para el comportamiento de las torres de enfriamiento. Kx es la tasa de transferencia de masa, análoga a Uc (Coeficiente global de transferencia de calor) en los intercambiadores” (pág. 4). Es necesario recordar que no hay un factor de obstrucción para transferir calor por conducción.

Los valores de “unidad de transferencia de masa” son medidas obtenidas del total de veces que han existido cambios de equilibrio en la interfase necesitados para ejecutar un volumen de difusión. De este procedimiento se consigue la transferencia de masa que va desde el flujo líquido a un flujo gaseoso.

En las TE el valor de “a”, es el área de contacto del aire con el agua, es difícil (o no se encuentra el método aún) calcular de forma directa, ya que las gotas se disponen azarosamente en las películas. Es posible, entonces, calcular “a”, obviando el producto de “Kxa” como un único factor para una clase particular de relleno a determinados flujos específicos de agua y aire (Villa, 2008, pág. 4).

Es necesario hallar coeficientes característicos de una TE para determinar la altura necesaria para la transferencia de masa y calor en una TE.

Con la ecuación 2.15, despejando y ordenando términos, luego se procede a integrar (desde la entrada de la TE hasta su salida), tendremos:

$$\dot{m}_{aire} dH_{aire} = Kxa (H' - H) AdZ$$

$$Z = \frac{\dot{m}_{aire}}{Kx a A} \int_{H1}^{H2} \frac{dH_{aire}}{(H' - H)} \quad (2.16)$$

$$Z = (HUT)_G (NUT)_G \quad (2.17)$$

Entonces:

$$(HUT)_G = \frac{\dot{m}_{aire}}{Kx a A} \quad (2.19)$$

$$(NUT)_G = \int_{H1}^{H2} \frac{dH_{aire}}{(H' - H)} \quad (2.20)$$

“(NUT)_G, es el número de unidades de transferencia, representa el número de veces que la fuerza impulsora promedio (H' – H) se divide entre el cambio de la entalpía. Es una medida de la dificultad de la transferencia de entalpía” (Villa, 2008, pág. 4).

La cantidad numérica de unidades de transferencia está definido por los requisitos del trabajo ejecutado e impuesto en la TE y no depende por el proceder *per se* de la TE, además, (HUT)_G determina la altura de una unidad de transferencia.

De la ecuación 2.16, afirma Villa (2008), “no es muy conveniente para usarse en el cálculo de torres de enfriamiento donde el interés principal se sitúa en la temperatura del agua producida” (pág. 4). Por esta razón, es necesario que la ecuación 2.16 se combine con la ecuación 2.12, obteniendo la siguiente:

$$Z = \frac{\dot{m}_{aire}}{Kx a A} \int_{H1}^{H2} \frac{C_{Pagua} dT}{(H' - H)} \quad (2.21)$$

$$Z = (HUT)_L (NUT)_L \quad (2.22)$$

Entonces:

$$(HUT)_L = \frac{\dot{m}_{agua}}{Kx a A} \quad (2.23)$$

$$(NUT)_L = \int_{H_1}^{H_2} \frac{C_{P_{agua}} dT}{(H' - H)} \quad (2.24)$$

De las ecuaciones 2.23 y 2.24, afirma Villa (2008) son las ecuaciones que determinan el diseño de una ‘torre de humidificación’. De igual manera, de acuerdo a Villa (2008), “para el cálculo de $(HUT)_G$ se deben determinar los caudales y los parámetros de la columna que permiten encontrar el coeficiente de transferencia” (p.4).

Los resultados de las entalpías de saturación H' son calculadas con una humedad relativa al 100% y la presión atmosférica, dependiendo del lugar donde se encuentre situada la TE, los valores de la entalpía de aire caliente, H , son calculadas con la temperatura de bulbo húmedo del aire (T_{bh1}).

Conforme a los estudios de Villa, “Las entalpías de saturación H' son calculadas con una humedad relativa al 100% y a presión atmosférica, (...), los valores de la entalpía de aire caliente, H , son calculadas con la temperatura de bulbo húmedo del aire (T_{bh1})” (Villa , 2008, pág. 64).

“Para el cálculo del número de unidades de transferencia se debe resolver la integral conociendo los valores de entalpía interfacial para que correspondan a los valores de entalpía del aire” (Villa , 2008, pág. 65).

Según Villa (2008), “los valores de entalpía interfacial dependen de la temperatura del líquido y de la entalpía del gas se deben tener una relación entre estas variables a lo largo de la columna” (p.65). La relación obtenida se llama ‘recta de operación’ y es el resultado del balance de entalpía”

$$H_2 = H_1 + \frac{m_{agua} C_p}{m_{aire}} (T_2 - T_1) \quad (2.25)$$

La ecuación 2.25 es igual que la ecuación 2.10, pero determinada de otra forma. Conforme a Villa (2008), “la temperatura T del agua no es función simple de las entalpías H' y H , es conveniente realizar la integración de la ecuación” (p. 65), (se refiere a la ecuación 2.21 de este trabajo de investigación, observado también en la (Figura 2.13). De acuerdo a Villa (2008), “entalpías de saturación H' para el aire se grafican en contra de la temperatura del agua T (...), la unión de los puntos que forman los valores de aire saturado H' generan una curva que representa la máxima saturación del aire” (p.65).

Las entalpías del aire (en la entrada H_1) fácilmente se determinan, alguna variación bajo el área de la curva temperatura vs entalpía determinará una diferencia en la altura de la TE, no obstante, los movimientos hacia abajo de la curva de operación de la TE y sabiendo que permanece constante a presión atmosférica la línea de saturación del aire, significará que disminuyan las unidades de transferencia y sea menor la altura de la TE.

De acuerdo a Villa (2008), “a cualquier temperatura T en la columna entre T_1 y T_2 , la potencia que impulsa al calor fuera de la película (...) es la diferencia entre el valor de H' y H en ese punto” (p.66).

Cogiendo minúsculos acrecentamientos de temperatura y dividiendo por la resta promedio de $H' - H$ para un incremento se adquiere la cantidad de unidades de transferencia necesitado para la variación de temperatura del agua. Cuando los acrecentamientos se adicionan, se determina el resultado global de NUT. Los puntos de inicio de la línea H_1 de operación se consigue del estado del aire atmosférico que ingresa a la TE por la fracción menor de la misma.

Para el estudio pormenorizado de las curvas de operación de las TE, es preferible determinar las curvas típicas individualmente de cada una de las variables más influyentes, estos son NUT y $K_x a$. $K_x a$ se encuentra en función del flujo másico de agua, aire y la superficie transversal de la TE, mediante la siguiente ecuación:

$$kxa = f(\mathbf{m}_{aire}, \mathbf{m}_{agua}, A) \quad (2.26)$$

NUT está determinado proporcionalmente por los flujos másicos de agua aire, el área transversal de la TE y altura del relleno, mediante la siguiente ecuación:

$$NUT = f(\mathbf{m}_{aire}, \mathbf{m}_{agua}, Z, A) \quad (2.27)$$

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Hipótesis General

Con el diseño e implementación de un prototipo de torre de enfriamiento con un relleno alternativo y al variar el flujo de agua por unidad de área, flujo de aire por unidad de área influirá significativamente en la obtención de las correlaciones de tasa global de transferencia de masa y caída de presión.

3.2 Hipótesis Específicas

Se determina las 4 hipótesis específicas de la presente investigación:

1. La variación en la velocidad del aire generará un cambio en la caída de presión a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento.
2. La variación en el flujo másico del aire por unidad de área generará un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del 'relleno alternativo' del prototipo de 'torre de enfriamiento'.
3. La variación en el flujo másico del agua por unidad de área generará un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del 'relleno alternativo' del prototipo de 'torre de enfriamiento'.
4. Las variaciones en el flujo másico de agua y en el flujo másico de aire por unidad de área generará un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del 'relleno alternativo' del prototipo de 'torre de enfriamiento'.

3.3 Tipo y Diseño de Investigación

En el libro 'El proceso de investigación científica', afirma Tamayo (2010), "la investigación recoge conocimientos o datos de fuentes primarias y los sistematiza para el logro de nuevos conocimientos. No es investigación confirmar o recopilar lo que ya es conocido o ha sido escrito por otros" (p. 40).

La investigación aplicada o empírica, según Murillo (2008), busca ejecutar de manera práctica los conocimientos que se adquieren, esto conlleva a una sistematización de los métodos de implementación de la investigación, que se convierten en insumos para futuros trabajos. Es dable conocer la realidad y hacerla práctica para la sociedad.

La investigación aplicada, afirma Carrasco (2013), "se distingue por tener propósitos prácticos inmediatos bien definidos, es decir, se investiga para actuar, transformar, modificar o producir cambios en un determinado sector de la realidad" (p.43). La investigación aplicada, guarda íntima relación con la básica y se enriquece con ellos, pero se caracteriza por su interés en la aplicación, utilización y consecuencias prácticas de los conocimientos, la investigación aplicada busca el conocer, para actuar, para construir, para modificar. (Zorrilla, 1993).

En este contexto la presente investigación se encuadra en la investigación aplicada, ya que plantea la búsqueda de la aplicación del conocimiento científico en proyectos ejecutables.

Sobre el diseño de investigación, afirma Ballestrini (2006), "se define como el plan global de investigación que integra de un modo coherente y adecuadamente correcto técnicas de recolección de datos a utilizar, análisis previstos y objetivos" (p. 131).

(Hernández, Fernández, & Baptista, 2006), afirman que es posible encontrar diferentes clasificaciones sobre la investigación cuantitativa, dentro de esta clasificación encontramos la experimental. En este sentido, explica

Ramón (2000), “los diseños experimentales intentan establecer básicamente relaciones causa-efecto. Más específicamente, cuando se desea estudiar como una variable independiente (causa) modifica una variable dependiente (efecto)” (p.1). La idea principal es manipular intencionalmente una condición de una variable para observar cual es su efecto en otra condición o entorno, tratando de controlar que no intervengan otras causas.

“El establecimiento de que, en un experimento, una variable independiente produce una variación específica (que solo puede ser atribuida a la variable independiente) en la variable dependiente depende fundamentalmente de la manera como esté diseñado el experimento” (Ramón, 2000, pág. 1). Es conveniente indicar que los procedimientos estadísticos ayudan a validar y/o confirmar el procedimiento usado, sin embargo, como afirma Ramón (2000), “el hecho de aplicar procedimientos estadísticos no permite afirmar que el experimento está bien diseñado, al punto de que se puede afirmar que las variaciones producidas en los sujetos experimentales sólo y exclusivamente pueden ser atribuidas a la variable independiente” (p.1).

En este contexto la presente investigación se enmarca en el diseño experimental.

3.4 Unidad de Análisis

La unidad de análisis para la presente investigación es el relleno de la TE que va a ser de un material reciclado.

3.5 Población de Estudio

La población de estudio de la presente investigación serán los ensayos de pruebas donde se flujo de agua y aire en la TE para poder encontrar las correlaciones de ‘caída de presión’ y ‘tasa global de transferencia de masa’ en el relleno alternativo.

3.6 Tamaño de la Muestra

El tamaño de la muestra de la presente investigación serán los 160 ensayos que se realizaron para encontrar las correlaciones de 'caída de presión' y 'tasa global de transferencia de masa' en el relleno alternativo.

3.7 Selección de la Muestra

La selección de la muestra de la presente investigación fueron los diferentes ensayos que se realizaron variando aleatoriamente los flujos de agua y aire.

3.8 Técnicas de Recolección de Datos

Se realizaron las siguientes etapas para recolectar los datos:

- a) Encender el calentador de agua y esperar aproximadamente 45 minutos, después encender el sistema de bombeo, ventilador, controladores de temperatura, medidor de flujo de agua, flujo de aire, medir flujo de agua, aire, realizando al menos 15 ensayos, por cada variación de caudales de agua y tomado el valor de la presión en la parte inferior y superior del relleno alternativo.
- b) Recolectar los datos de 'flujo másico de agua y aire por unidad de área', 'las temperaturas de entrada y salida del flujo de agua', 'temperatura de bulbo húmedo' y 'la entalpía del aire' a esa temperatura. Se mantendrá constante el flujo másico de agua en cada muestra, datos que nos servirán para calcular la unidad de transferencia y tasa de transferencia de masa.

CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL PROTOTIPO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO Y DETERMINACIÓN DE CORRELACIONES DE OPERACIÓN PARA EL RELLENO ALTERNATIVO

En el capítulo 4 de la presente investigación se procede a mostrar detalladamente el proceso de diseño de la TE, y se la realizó mediante un análisis de todas las variables que intervienen en el proceso de bajar la temperatura del agua caliente que entra a la TE, con la aplicación de las ecuaciones anteriormente descritas.

El diseño de la TE depende de algunos factores tales como: temperatura del agua caliente que entra, temperatura de bulbo húmedo, flujo de agua, flujo de aire, temperatura del agua fría que sale, utilización, donde va a estar ubicada, velocidad del viento.

4.1 Elección del tipo de TE

La elección de una TE, se la realiza de acuerdo a las condiciones o factores anteriormente descritas, en cuanto a su utilización que va a ser uno de los aspectos más importantes, los alumnos de Ingeniería Industrial de la 'Universidad Politécnica Salesiana' sede Guayaquil la utilizarán en las prácticas de las materias Termodinámica y Transferencia de calor en el respectivo laboratorio de la misma ya que por el momento no se dispone de una TE, su ubicación será en el laboratorio de transferencia de calor y fluidos de la Universidad que está ubicada en la ciudad de Guayaquil, que se encuentra a una altura de 4 metros sobre el nivel del mar y a una presión de 101,3 Kpa, el flujo de agua a enfriar es de 8 l/min a 15 l/min o 0,133 Kg/s a 0,25 Kg/s, la temperatura del agua a enfriar está entre 40 a 50 grados centígrados, la misma que será tratada mediante un sistema de ablandamiento, considerando los parámetros antes mencionados se ha seleccionado una TE mecánica de tiro inducido a contraflujo ya que ofrece

una mejor facilidad de montaje y funcionamiento para fines didácticos y demostrativos.

4.2 Elección del tipo de relleno

Anteriormente se mencionó que era y para qué sirve un relleno en la TE, en cuanto al relleno que se va a utilizar se debe considerar principalmente su costo y disponibilidad en el mercado, como se indicó en la problemática de esta investigación, se utilizará un relleno alternativo, cuyo material es el teflón que se encuentra en los rodillos del mismo material que ya han cumplido su vida útil y de esta manera se procederá a reciclar este elemento industrial ayudando a preservar el medio ambiente, cabe indicar que existen muchas investigaciones sobre diversos materiales alternativos y de diferentes formas, en cuanto al material que se va a utilizar como relleno, les daremos formas de panales y se procederá a encontrar sus correlaciones de caída de presión y transferencia de masa, las mismas que se asemejan a los rellenos alternativos investigados y a los comerciales.



Figura 4.1 Material de relleno alternativo

Fuente. El Autor

4.3 Cálculo de la sección transversal

Se procede a calcular la sección transversal de la TE a partir de la ecuación de continuidad para el flujo de aire.

Ecuación 4.1

$$A = \frac{G \times V}{V} \quad (4.1)$$

Donde:

A = Área de la sección transversal de la TE

G = Flujo másico de aire

V = Velocidad del aire

V = Volumen específico saturado a temperatura de bulbo húmedo

Para la aplicación de la ecuación 1 debemos aplicar los siguientes valores:

Flujo de agua $L = 0.25 \text{ Kg/s}$

Temperatura de bulbo húmedo $T_{bh} = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Razón aire-agua $G/L = 1.6 \text{ (Kg aire/Kg agua)}$

Velocidad del aire $V = 1.85 \text{ m/s}$

Volumen específico $V = 0.874 \text{ m}^3/\text{Kg}$

$$G = 1.6 \times 0.25 = 0.4 \text{ Kg aire/s}$$

$$A = \frac{0.4 \times 0.874}{1.85}$$

$$A = 0.188 \text{ m}^2$$

Obteniéndose una sección de 0.44 metros por lado.

4.4 Selección del ventilador

Para la selección del ventilador se procede a utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación 4.2

$$Q = G \times V \quad (4.2)$$

Donde:

Q = Caudal en m^3/s

G = Flujo másico de aire en Kg/s

V = Volumen específico saturado en m^3/Kg

$$Q = 0.4 \times 0.874$$

$$Q = 0.35 m^3/s = 740 CFM$$

4.5 Selección de la bomba de Agua

Para seleccionar la bomba de agua adecuada primero es necesario definir el caudal a usarse para que satisfaga con lo que exige el sistema, es decir, obtener una bomba de agua que cumpla con el caudal máximo y venza las pérdidas de fricción en la tubería y los diferentes accesorios, más el cabezal de diferencia de altura, estas pérdidas asumiremos insignificantes ya que las distancias de las tuberías son demasiado cortas y la altura de distribución de agua es muy pequeña.

Los rangos establecidos anteriormente son mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 4.1 Determinación del rango de operación de la bomba de agua

	'Determinación del rango de operación'		
	$Kg/s \ m^2$	Kg/s	L/m
Valor mínimo	0.7074	0.133	8
Valor máximo	1.33	0.25	15

Fuente. El Autor

En consecuencia, se necesita una bomba con un flujo másico de agua que tenga como un valor de caudal como mínimo de 15 l/m.

4.6 Obtención de datos experimentales

Para la obtención de los datos experimentales, estos serán divididos en dos partes, una para la caída de presión en el relleno alternativo y otra para los datos térmicos que me ayudaran a encontrar la correlación de la tasa global de transferencia de masa.



Figura 4.2 Registro de datos experimentales

Fuente. El Autor

4.6.1 Obtención de datos térmicos

Para la toma de los ensayos experimentales y poder realizar el análisis térmico serán recolectados en diferentes pruebas, los valores más importantes serán el flujo de agua, aire, temperatura del calentador de agua, temperatura de la bandeja de agua fría y la temperatura de bulbo húmedo.

Es necesario determinar la cantidad de flujo de agua y aire que van hacer utilizados en el interior de la TE, el flujo de agua será medido por el

caudalímetro ultrasónico de sujeción FUP 1010, las temperaturas del agua caliente y fría serán medidas por el controlador de temperatura TCN4S mediante la información enviada por la termocupla J56000.



Figura 4.3 Obtención de datos térmicos

Fuente. El Autor

En la primera recolección de los datos térmicos los valores de la temperatura del agua caliente que entra a la TE, se la denominara como T1, mientras la temperatura del agua a la salida de la TE la denominara como T2, también se medirá la temperatura de bulbo húmedo del ambiente y se la denominara como Tbh, el flujo másico de agua por unidad de área será de: 0.7074 Kg/sm², 0.88 Kg/sm², 1.06 Kg/sm² y 1.33 Kg/sm².

Tabla 4.2 Obtención de datos térmicos a 0.7074 kg/sm²

Datos térmicos a 0.7074 kg/sm ²								
TOMA	m aire/area	VELOCIDAD	TEMP AGUA CALIENTE(T1)	TEMP AGUA FRIA(T2)	cambio de T	$\frac{\dot{m}_{agua} . Cp_{agua}}{\dot{m}_{aire}}$	Tbh 1	h1
	Kg/sm2	m/s	C	C	C	Kj/KgK	C	Kj/Kg
1	0,114	0,1	41,99	39,99	2,00	25,88	26	80,9
2	0,481	0,42	41,8	39	2,80	6,16	26	80,9
3	0,572	0,5	42	37,6	4,40	5,18	26	80,9
4	0,686	0,6	42	37,8	4,20	4,31	26	80,9
5	0,801	0,7	42,1	37,8	4,30	3,70	26	80,9
6	1,030	0,9	42	38,4	3,60	2,88	26	80,9
7	1,144	1	42,1	38,1	4,00	2,59	26	80,9
8	1,259	1,1	42,1	38,2	3,90	2,35	26	80,9
9	1,373	1,2	42	36,9	5,10	2,16	26	80,9
10	1,487	1,3	41,9	35,8	6,10	1,99	26	80,9
11	1,602	1,4	41,4	35,7	5,70	1,85	26	80,9
12	1,716	1,5	41,4	35,8	5,60	1,73	26	80,9
13	1,831	1,6	41,3	35,9	5,40	1,62	26	80,9
14	1,945	1,7	41,2	35,9	5,30	1,52	26	80,9
15	2,105	1,84	41	35,9	5,10	1,41	26	80,9

Fuente. El Autor**Tabla 4.3 Obtención de datos térmicos a 0.88 kg/sm²**

Datos térmicos a 0.88 kg/sm ²								
TOMA	m aire/area	VELOCIDAD	TEMP AGUA CALIENTE(T1)	TEMP AGUA FRIA(T2)	cambio de T	$\frac{\dot{m}_{agua} . Cp_{agua}}{\dot{m}_{aire}}$	Tbh 1	h1
	Kg/sm2	m/s	C	C	C	Kj/KgK	C	Kj/Kg
1	0,114	0,1	47,3	43,5	3,80	32,20	25,5	78,723
2	0,481	0,42	47,4	43,6	3,80	7,67	25,5	78,723
3	0,572	0,5	47,4	43,3	4,10	6,44	25,5	78,723
4	0,686	0,6	47,3	42,5	4,80	5,37	25,5	78,723
5	0,801	0,7	47,5	41,7	5,80	4,60	25,5	78,723
6	1,030	0,9	47,5	39,7	7,80	3,58	25,5	78,723
7	1,144	1	47,4	39,2	8,20	3,22	25,5	78,723
8	1,259	1,1	47,3	37,8	9,50	2,93	25,5	78,723
9	1,373	1,2	47,1	37,6	9,50	2,68	25,5	78,723
10	1,487	1,3	46,9	37,4	9,50	2,48	25,5	78,723
11	1,602	1,4	46,8	37,4	9,40	2,30	25,5	78,723
12	1,716	1,5	46,7	37,3	9,40	2,15	25,5	78,723
13	1,831	1,6	46,8	37,2	9,60	2,01	25,5	78,723
14	1,945	1,7	46,9	37,1	9,80	1,89	25,5	78,723
15	2,105	1,84	47	37	10,00	1,75	25,5	78,723

Fuente. El Autor

Tabla 4.4 Obtención de datos térmicos a 1.06 kg/sm²

Datos térmicos a 1.06 kg/sm ²								
TOMA	m aire/area	VELOCIDAD	TEMP AGUA CALIENTE(T1)	TEMP AGUA FRIA(T2)	cambio de T	$\frac{\dot{m}_{agua} \cdot Cp_{agua}}{\dot{m}_{aire}}$	Tbh 1	h1
	Kg/sm2	m/s	C	C	C	Kj/KgK	C	Kj/Kg
1	0,114	0,1	46,1	38,4	7,7	38,78	25	76,593
2	0,481	0,42	46	39,2	6,8	9,23	25	76,593
3	0,572	0,5	45,8	40,3	5,5	7,76	25	76,593
4	0,686	0,6	45,7	40,3	5,4	6,46	25	76,593
5	0,801	0,7	45,6	40	5,6	5,54	25	76,593
6	1,030	0,9	45,6	39	6,6	4,31	25	76,593
7	1,144	1	45,7	37,6	8,1	3,88	25	76,593
8	1,259	1,1	45,6	35,8	9,8	3,53	25	76,593
9	1,373	1,2	45,5	35	10,5	3,23	25	76,593
10	1,487	1,3	45,4	33,3	12,1	2,98	25	76,593
11	1,602	1,4	45,6	32,8	12,8	2,77	25	76,593
12	1,716	1,5	45,7	32,7	13	2,59	25	76,593
13	1,831	1,6	45,8	32,6	13,2	2,42	25	76,593
14	1,945	1,7	45,7	32,6	13,1	2,28	25	76,593
15	2,105	1,84	45,5	32,6	12,9	2,11	25	76,593

Fuente. El Autor

Tabla 4.5 Obtención de datos térmicos a 1.33 kg/sm²

Datos térmicos a 1.33 kg/sm ²								
TOMA	m aire/area	VELOCIDAD	TEMP AGUA CALIENTE(T1)	TEMP AGUA FRIA(T2)	cambio de T	$\frac{\dot{m}_{agua} \cdot Cp_{agua}}{\dot{m}_{aire}}$	Tbh 1	h1
	Kg/sm2	m/s	C	C	C	Kj/KgK	C	Kj/Kg
1	0,114	0,1	45	39,5	5,5	48,66	25	76,593
2	0,481	0,42	44,9	39,5	5,4	11,59	25	76,593
3	0,572	0,5	44,6	39,5	5,1	9,73	25	76,593
4	0,686	0,6	44,7	39,1	5,6	8,11	25	76,593
5	0,801	0,7	44,5	38,5	6	6,95	25	76,593
6	1,030	0,9	44,4	38,5	5,9	5,41	25	76,593
7	1,144	1	44,5	36,7	7,8	4,87	25	76,593
8	1,259	1,1	44,5	36,2	8,3	4,42	25	76,593
9	1,373	1,2	44,5	36,1	8,4	4,05	25	76,593
10	1,487	1,3	44,6	36	8,6	3,74	25	76,593
11	1,602	1,4	44,6	35,4	9,2	3,48	25	76,593
12	1,716	1,5	44,5	35,2	9,3	3,24	25	76,593
13	1,831	1,6	44,6	34,7	9,9	3,04	25	76,593
14	1,945	1,7	44,5	34,5	10	2,86	25	76,593
15	2,105	1,84	44,5	34,1	10,4	2,64	25	76,593

Fuente. El Autor

4.6.2 Obtención de los datos para caída de presión en el relleno alternativo

Para la toma de los ensayos experimentales y realizar el análisis de caída de presión en el relleno alternativo de la TE, se procederá a medir la velocidad del aire que pasa a través de la TE, aire que es producido por el ventilador axial Siemens motor trifásico, se procederá a medir la presión con un manómetro diferencial en 2 puntos diferentes, uno en la parte baja del relleno y otro en la parte superior del relleno, el flujo másico de agua por unidad de área serán de: 0.7074 Kg/sm², 0.88 Kg/sm², 1.06 Kg/sm² y 1.33 Kg/sm².

Tabla 4.6 Obtención de datos de caída de presión a 0.7074 kg/sm²

Datos caída de presión a 0.7074 kg/sm ²			
TOMA	VELOCIDAD	CAÍDA DE PRESIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN
	m/s	lnH20	Pa
1	0,1	0,040	9,95
2	0,42	0,070	17,42
3	0,5	0,080	19,91
4	0,6	0,090	22,4
5	0,7	0,100	24,89
6	0,9	0,160	39,82
7	1	0,250	62,61
8	1,1	0,270	67,19
9	1,2	0,300	74,65
10	1,3	0,320	79,63
11	1,4	0,400	99,54
12	1,5	0,420	104,51
13	1,6	0,430	107
14	1,7	0,440	109,49
15	1,84	0,620	154,29

Fuente. El Autor

Tabla 4.7 Obtención de datos de caída de presión a 0.88 kg/sm²

Datos caída de presión a 0.88 kg/sm ²			
TOMA	VELOCIDAD	CAÍDA DE PRESIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN
	m/s	InH2O	Pa
1	0,1	0,041	10,2
2	0,42	0,072	17,92
3	0,5	0,080	19,9
4	0,6	0,092	22,89
5	0,7	0,100	24,88
6	0,9	0,163	40,56
7	1	0,252	62,7
8	1,1	0,274	68,18
9	1,2	0,310	77,14
10	1,3	0,321	79,88
11	1,4	0,410	102,02
12	1,5	0,425	105,76
13	1,6	0,435	108,25
14	1,7	0,445	110,73
15	1,84	0,630	156,77

Fuente. El Autor

Tabla 4.8 Obtención de datos de caída de presión a 1.06 kg/sm²

Datos caída de presión a 1.06 kg/sm ²			
TOMA	VELOCIDAD	CAÍDA DE PRESIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN
	m/s	InH2O	Pa
1	0,1	0,041	10,2
2	0,42	0,074	18,41
3	0,5	0,080	19,91
4	0,6	0,093	23,14
5	0,7	0,110	27,37
6	0,9	0,171	42,55
7	1	0,270	67,19
8	1,1	0,280	69,67
9	1,2	0,330	82,12
10	1,3	0,360	89,58
11	1,4	0,430	107
12	1,5	0,440	109,49
13	1,6	0,445	110,7
14	1,7	0,500	124,42
15	1,84	0,690	171,7

Fuente. El Autor

Tabla 4.9 Obtención de datos de caída de presión a 1.33 kg/sm²

Datos caída de presión a 1.33 kg/sm ²			
TOMA	VELOCIDAD	CAÍDA DE PRESIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN
	m/s	lnH20	Pa
1	0,1	0,050	12,44
2	0,42	0,080	19,9
3	0,5	0,100	24,89
4	0,6	0,150	37,33
5	0,7	0,160	39,82
6	0,9	0,190	47,28
7	1	0,300	74,65
8	1,1	0,320	79,63
9	1,2	0,350	87,09
10	1,3	0,380	94,56
11	1,4	0,450	111,98
12	1,5	0,470	116,95
13	1,6	0,490	121,93
14	1,7	0,580	144,32
15	1,84	0,720	179,16

Fuente. El Autor

4.6.3 Procesamiento de datos y obtención de coeficientes para la correlación seleccionada para la tasa de transferencia de masa

Para poder hallar el valor de la máxima entalpía de saturación del aire cuando se encuentra saturado (H'), se debe utilizar los valores siguientes y realizar los respectivos cálculos:

Peso molecular del agua (PMag): 18.02 Kg/Kmol

Peso molecular del aire (PMai): 29 Kg/Kmol

Coeficiente de Antoine para agua (A): 16.3872

Coeficiente de Antoine para agua (B): 3885.7

Coeficiente de Antoine para agua (C): 230.17

Presión Atmosférica (Pa): 101.3 KPa

Presión de saturación (Ps) : $e^{A - \frac{B}{T+C}}$ Kpa

Humedad absoluta (Y'): $\frac{PMag * Ps}{PMai * (Pa - Ps)}$

Entalpía de saturación del aire (H'): $\frac{(1005 + 1884 * Y')T + (2502300 * Y')}{1000}$ KJ/Kg

Realizando los respectivos cálculos, obtendremos la siguiente tabla:

Tabla 4.10 Entalpía de saturación del aire

TEMP	P SAT	HUM ABS	H´
25	3.1876	0.0202	76.593
26	3.3829	0.0215	80.900
27	3.5884	0.0228	85.397
28	3.8047	0.0242	90.097
29	4.0321	0.0258	95.008
30	4.2713	0.0274	100.144
31	4.5227	0.0290	105.515
32	4.7868	0.0308	111.135
33	5.0641	0.0327	117.018
34	5.3552	0.0577	182.350
35	5.6606	0.0368	129.628
36	5.9810	0.0390	136.388
37	6.3169	0.0413	143.473
38	6.6689	0.0438	150.901
39	7.0377	0.0464	158.692
40	7.4240	0.0491	166.867
41	7.8283	0.0520	175.447
42	8.2515	0.0551	184.457
43	8.6942	0.0583	193.920
44	9.1572	0.0618	203.863
45	9.6412	0.0654	214.317
46	10.1470	0.0692	225.310
47	10.6753	0.0732	236.876
48	11.2271	0.0775	249.051
49	11.8032	0.0819	261.873
50	12.4043	0.0867	275.382

Fuente. El Autor

Tabla 4.11 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 1.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,99	166,03	80,90	85,13		
	40,27	169,14	88,15	80,99	83,06	0,0034
	40,55	171,53	95,39	76,14	78,57	0,0036
	40,83	173,96	102,64	71,32	73,73	0,0038
	41,11	176,42	109,89	66,53	68,93	0,0041
	41,39	178,91	117,13	61,78	64,16	0,0044
	41,67	181,44	124,38	57,06	59,42	0,0047
"T1"	41,99	184,36	132,66	51,70	54,38	0,0059
					TOTAL	0,0298

Fuente. El Autor

Tabla 4.12 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 2.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,00	158,69	80,90	77,79		
	39,40	161,92	83,36	78,56	78,17	0,0051
	39,80	165,20	85,83	79,37	78,96	0,0051
	40,20	168,55	88,29	80,26	79,82	0,0050
	40,60	171,97	90,76	81,21	80,74	0,0050
	41,00	175,45	93,22	82,23	81,72	0,0049
	41,40	178,99	95,68	83,31	82,77	0,0048
"T1"	41,80	182,62	98,15	84,47	83,89	0,0048
					TOTAL	0,0346

Fuente. El Autor

Tabla 4.13 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 3.

	°C	H'	H	$H' - H$	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,60	147,89	80,90	66,99		
	38,22	152,58	84,11	68,47	67,73	0,0092
	38,84	157,42	87,32	70,10	69,28	0,0089
	39,46	162,41	90,53	71,88	70,99	0,0087
	40,08	167,54	93,75	73,79	72,83	0,0085
	40,70	172,83	96,96	75,87	74,83	0,0083
	41,32	178,28	100,17	78,11	76,99	0,0081
"T1"	42,00	184,46	103,69	80,77	79,44	0,0086
					TOTAL	0,0602

Fuente. El Autor

Tabla 4.14 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 4.

	°C	H'	H	$H' - H$	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,80	149,39	80,90	68,49		
	38,40	153,97	83,49	70,48	69,49	0,0086
	39,00	158,69	86,07	72,62	71,55	0,0084
	39,60	163,55	88,66	74,89	73,76	0,0081
	40,20	168,55	91,24	77,31	76,10	0,0079
	40,80	173,70	93,83	79,87	78,59	0,0076
	41,40	179,00	96,42	82,58	81,23	0,0074
"T1"	42,00	184,46	99,00	85,46	84,02	0,0071
					TOTAL	0,0552

Fuente. El Autor

Tabla 4.15 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 5.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,80	149,39	80,90	68,49		
	38,40	153,97	83,12	70,85	69,67	0,0086
	39,00	158,69	85,34	73,35	72,10	0,0083
	39,60	163,55	87,56	75,99	74,67	0,0080
	40,20	168,55	89,78	78,77	77,38	0,0078
	40,80	173,70	92,00	81,70	80,24	0,0075
	41,40	179,00	94,22	84,78	83,24	0,0072
"T1"	42,10	185,38	96,81	88,57	86,68	0,0081
					TOTAL	0,0555

Fuente. El Autor

Tabla 4.16 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 6.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	38,40	153,97	80,90	73,07		
	38,91	157,98	82,37	75,61	74,34	0,0069
	39,42	162,08	83,84	78,24	76,93	0,0066
	39,93	166,28	85,31	80,97	79,61	0,0064
	40,44	170,59	86,78	83,81	82,39	0,0062
	40,95	175,00	88,24	86,76	85,29	0,0060
	41,46	179,54	89,71	89,83	88,29	0,0058
"T1"	42,00	184,46	91,27	93,19	91,51	0,0059
					TOTAL	0,0437

Fuente. El Autor

Tabla 4.17 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 7.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	38,10	151,66	80,90	70,76		
	38,67	156,08	82,38	73,70	72,23	0,0079
	39,24	160,60	83,85	76,75	75,23	0,0076
	39,81	165,28	85,33	79,95	78,35	0,0073
	40,38	170,08	86,81	83,27	81,61	0,0070
	40,95	175,00	88,28	86,72	85,00	0,0067
	41,52	180,07	89,76	90,31	88,52	0,0064
"T1"	42,10	185,38	91,26	94,12	92,22	0,0063
					TOTAL	0,0492

Fuente. El Autor

Tabla 4.18 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 8.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	38,20	152,43	80,90	71,53		
	38,67	156,08	82,00	74,08	72,80	0,0065
	39,24	160,60	83,34	77,26	75,67	0,0075
	39,81	165,28	84,68	80,60	78,93	0,0072
	40,38	170,08	86,02	84,06	82,33	0,0069
	40,95	175,00	87,36	87,64	85,85	0,0066
	41,52	180,07	88,70	91,37	89,50	0,0064
"T1"	42,10	185,38	90,07	95,32	93,34	0,0062
					TOTAL	0,0474

Fuente. El Autor

Tabla 4.19 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 9.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	36,90	142,75	80,90	61,85		
	37,62	148,04	82,46	65,58	63,72	0,0113
	38,34	153,51	84,01	69,50	67,54	0,0107
	39,06	159,17	85,57	73,60	71,55	0,0101
	39,78	165,04	87,12	77,92	75,76	0,0095
	40,50	171,10	88,68	82,42	80,17	0,0090
	41,22	177,39	90,23	87,16	84,79	0,0085
"T1"	42,00	184,46	91,92	92,54	89,85	0,0087
					TOTAL	0,0677

Fuente. El Autor

Tabla 4.20 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 10.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,80	135,01	80,90	54,11		
	36,67	141,09	82,63	58,46	56,28	0,0155
	37,54	147,44	84,36	63,08	60,77	0,0143
	38,41	154,05	86,09	67,96	65,52	0,0133
	39,28	160,94	87,83	73,11	70,54	0,0123
	40,15	168,13	89,56	78,57	75,84	0,0115
	41,02	175,62	91,29	84,33	81,45	0,0107
"T1"	41,90	183,54	93,04	90,50	87,42	0,0101
					TOTAL	0,0876

Fuente. El Autor

Tabla 4.21 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 11.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,70	134,33	80,90	53,43		
	36,51	139,96	82,40	57,56	55,50	0,0146
	37,32	145,81	83,90	61,91	59,74	0,0136
	38,13	151,89	85,40	66,49	64,20	0,0126
	38,94	158,21	86,89	71,32	68,91	0,0118
	39,75	164,79	88,39	76,40	73,86	0,0110
	40,56	171,62	89,89	81,73	79,06	0,0102
"T1"	41,40	178,99	91,45	87,55	84,64	0,0099
					TOTAL	0,0837

Fuente. El Autor

Tabla 4.22 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 12.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,80	135,01	80,90	54,11		
	36,51	139,96	82,13	57,83	55,97	0,0127
	37,32	145,81	83,53	62,28	60,06	0,0135
	38,13	151,89	84,93	66,96	64,62	0,0125
	38,94	158,21	86,33	71,88	69,42	0,0117
	39,75	164,79	87,73	77,06	74,47	0,0109
	40,56	171,62	89,13	82,49	79,77	0,0102
"T1"	41,40	178,99	90,59	88,40	85,44	0,0098
					TOTAL	0,0812

Fuente. El Autor

Tabla 4.23 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 13.

	°C	H`	H	H`-H	$\overline{(H` - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H` - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,90	135,70	80,90	54,80		
	36,51	139,96	81,89	58,07	56,44	0,0108
	37,32	145,81	83,20	62,61	60,34	0,0134
	38,13	151,89	84,51	67,38	64,99	0,0125
	38,94	158,21	85,82	72,39	69,88	0,0116
	39,75	164,79	87,14	77,65	75,02	0,0108
	40,56	171,62	88,45	83,17	80,41	0,0101
"T1"	41,30	178,10	89,65	88,45	85,81	0,0086
					TOTAL	0,0778

Fuente. El Autor

Tabla 4.24 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 14.

	°C	H`	H	H`-H	$\overline{(H` - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H` - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,90	135,70	80,90	54,80		
	36,51	139,96	81,83	58,13	56,47	0,0108
	37,32	145,81	83,06	62,75	60,44	0,0134
	38,13	151,89	84,29	67,60	65,18	0,0124
	38,94	158,21	85,52	72,69	70,14	0,0115
	39,75	164,79	86,75	78,04	75,36	0,0107
	40,56	171,62	87,98	83,64	80,84	0,0100
"T1"	41,20	177,21	88,96	88,25	85,95	0,0074
					TOTAL	0,0764

Fuente. El Autor

Tabla 4.25 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 15.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,90	135,70	80,90	54,80		
	36,51	139,96	81,76	58,20	56,50	0,0108
	37,32	145,81	82,90	62,91	60,55	0,0134
	38,13	151,89	84,04	67,85	65,38	0,0124
	38,94	158,21	85,19	73,02	70,43	0,0115
	39,75	164,79	86,33	78,46	75,74	0,0107
	40,56	171,62	87,47	84,15	81,31	0,0100
"T1"	41,00	175,45	88,09	87,36	85,75	0,0051
					TOTAL	0,0739

Fuente. El Autor

Tabla 4.26 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 16.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	43,50	198,83	78,72	120,11		
	44,04	204,27	96,11	108,16	114,13	0,0047
	44,58	289,86	113,50	176,36	142,26	0,0038
	45,12	215,61	130,89	84,72	130,54	0,0041
	45,66	221,51	148,28	73,24	78,98	0,0068
	46,20	227,57	165,66	61,91	67,57	0,0080
	46,74	233,81	183,05	50,76	56,33	0,0096
"T1"	47,30	240,46	201,08	39,38	45,07	0,0124
					TOTAL	0,0495

Fuente. El Autor

Tabla 4.27 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 17.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	43,60	199,83	78,72	121,11		
	44,04	204,27	82,10	122,17	121,64	0,0036
	44,58	289,86	86,24	203,62	162,90	0,0033
	45,12	215,61	90,38	125,23	164,42	0,0033
	45,66	221,51	94,52	126,99	126,11	0,0043
	46,20	227,57	98,67	128,91	127,95	0,0042
	46,74	233,81	102,81	131,00	129,95	0,0042
"T1"	47,40	241,67	107,87	133,80	132,40	0,0050
					TOTAL	0,0279

Fuente. El Autor

Tabla 4.28 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 18.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	43,30	196,85	78,72	118,13		
	44,04	204,27	83,49	120,78	119,45	0,0062
	44,58	289,86	86,97	202,89	161,84	0,0033
	45,12	215,61	90,44	125,17	164,03	0,0033
	45,66	221,51	93,92	127,59	126,38	0,0043
	46,20	227,57	97,40	130,17	128,88	0,0042
	46,74	233,81	100,88	132,93	131,55	0,0041
"T1"	47,40	241,67	105,13	136,54	134,74	0,0049
					TOTAL	0,0303

Fuente. El Autor

Tabla 4.29 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 19.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	42,50	189,13	78,72	110,41		
	43,19	195,77	82,43	113,34	111,87	0,0062
	43,88	202,64	86,13	116,51	114,92	0,0060
	44,57	209,76	89,84	119,92	118,21	0,0058
	45,26	217,12	93,54	123,58	121,75	0,0057
	45,95	224,75	97,25	127,50	125,54	0,0055
	46,64	232,64	100,95	131,69	129,59	0,0053
"T1"	47,30	240,46	104,50	135,96	133,82	0,0049
					TOTAL	0,0394

Fuente. El Autor

Tabla 4.30 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 20.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	41,70	181,71	78,72	102,99		
	42,52	189,32	82,50	106,83	104,91	0,0078
	43,34	197,25	86,27	110,98	108,90	0,0075
	44,16	205,50	90,04	115,46	113,22	0,0072
	44,98	214,11	93,81	120,30	117,88	0,0070
	45,80	223,07	97,58	125,49	122,89	0,0067
	46,62	232,41	101,36	131,06	128,27	0,0064
"T1"	47,50	242,88	105,40	137,48	134,27	0,0066
					TOTAL	0,0492

Fuente. El Autor

Tabla 4.31 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 21.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,70	164,37	78,72	85,65		
	40,80	173,70	82,66	91,04	88,34	0,0125
	41,90	183,54	86,60	96,94	93,99	0,0117
	43,00	193,92	90,54	103,38	100,16	0,0110
	44,10	204,88	94,48	110,41	106,89	0,0103
	45,20	216,47	98,41	118,06	114,23	0,0096
	46,30	228,72	102,35	126,37	122,21	0,0090
"T1"	47,50	242,88	106,65	136,23	131,30	0,0091
					TOTAL	0,0732

Fuente. El Autor

Tabla 4.32 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 22.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,20	160,30	78,72	81,58		
	40,80	173,70	83,88	89,83	85,70	0,0187
	41,90	183,54	87,42	96,12	92,97	0,0118
	43,00	193,92	90,96	102,96	99,54	0,0111
	44,10	204,88	94,50	110,38	106,67	0,0103
	45,20	216,47	98,04	118,43	114,40	0,0096
	46,30	228,72	101,59	127,14	122,78	0,0090
"T1"	47,40	241,67	105,13	136,54	131,84	0,0083
					TOTAL	0,0788

Fuente. El Autor

Tabla 4.33 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 23.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,80	149,39	78,72	70,67		
	39,15	159,90	82,68	77,22	73,94	0,0183
	40,50	171,10	86,63	84,47	80,84	0,0167
	41,85	183,07	90,59	92,48	88,47	0,0153
	43,20	195,87	94,55	101,33	96,90	0,0139
	44,55	209,55	98,50	111,05	106,19	0,0127
	45,90	224,19	102,46	121,73	116,39	0,0116
"T1"	47,30	240,46	106,56	133,90	127,82	0,0110
					TOTAL	0,0994

Fuente. El Autor

Tabla 4.34 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 24.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,60	147,88	78,72	69,16		
	39,15	159,90	82,88	77,02	73,09	0,0212
	40,50	171,10	86,50	84,61	80,81	0,0167
	41,85	183,07	90,11	92,96	88,78	0,0152
	43,20	195,87	93,73	102,14	97,55	0,0138
	44,55	209,55	97,35	112,20	107,17	0,0126
	45,90	224,19	100,97	123,22	117,71	0,0115
"T1"	47,10	238,06	104,18	133,88	128,55	0,0093
					TOTAL	0,1004

Fuente. El Autor

Tabla 4.35 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 25.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,40	146,40	78,72	67,68		
	39,15	159,90	83,06	76,84	72,26	0,0242
	40,50	171,10	86,41	84,69	80,76	0,0167
	41,85	183,07	89,76	93,31	89,00	0,0152
	43,20	195,87	93,11	102,76	98,04	0,0138
	44,55	209,55	96,46	113,10	107,93	0,0125
	45,90	224,19	99,80	124,38	118,74	0,0114
"T1"	46,90	235,69	102,28	133,41	128,89	0,0078
					TOTAL	0,1015

Fuente. El Autor

Tabla 4.36 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 26.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,40	146,40	78,72	67,68		
	39,15	159,90	82,75	77,15	72,41	0,0242
	40,50	171,10	85,85	85,25	81,20	0,0166
	41,85	183,07	88,96	94,11	89,68	0,0151
	43,20	195,87	92,06	103,81	98,96	0,0136
	44,55	209,55	95,17	114,38	109,09	0,0124
	45,90	224,19	98,27	125,91	120,15	0,0112
"T1"	46,80	234,52	100,34	134,18	130,04	0,0069
					TOTAL	0,1000

Fuente. El Autor

Tabla 4.37 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 27.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,30	145,66	78,72	66,94		
	39,15	159,90	82,70	77,20	72,07	0,0257
	40,50	171,10	85,60	85,50	81,35	0,0166
	41,85	183,07	88,51	94,56	90,03	0,0150
	43,20	195,87	91,41	104,46	99,51	0,0136
	44,55	209,55	94,31	115,24	109,85	0,0123
	45,90	224,19	97,21	126,97	121,11	0,0111
"T1"	46,70	233,34	98,93	134,41	130,69	0,0061
					TOTAL	0,1004

Fuente. El Autor

Tabla 4.38 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 28.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,20	144,93	78,72	66,21		
	39,15	159,90	82,64	77,26	71,73	0,0272
	40,50	171,10	85,36	85,74	81,50	0,0166
	41,85	183,07	88,07	95,00	90,37	0,0149
	43,20	195,87	90,78	105,09	100,04	0,0135
	44,55	209,55	93,50	116,05	110,57	0,0122
	45,90	224,19	96,21	127,98	122,01	0,0111
"T1"	46,80	234,52	98,02	136,50	132,24	0,0068
					TOTAL	0,1023

Fuente. El Autor

Tabla 4.39 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 29.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,10	144,20	78,72	65,48		
	39,15	159,90	82,60	77,30	71,39	0,0287
	40,50	171,10	85,15	85,95	81,63	0,0165
	41,85	183,07	87,70	95,37	90,66	0,0149
	43,20	195,87	90,25	105,62	100,49	0,0134
	44,55	209,55	92,80	116,75	111,18	0,0121
	45,90	224,19	95,36	128,83	122,79	0,0110
"T1"	46,90	235,69	97,25	138,45	133,64	0,0075
					TOTAL	0,1042

Fuente. El Autor

Tabla 4.40 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 30.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,00	143,47	78,72	64,75		
	38,43	154,21	81,23	72,98	68,87	0,0208
	39,86	165,70	83,73	81,97	77,48	0,0185
	41,29	178,01	86,23	91,78	86,88	0,0165
	42,72	191,22	88,73	102,49	97,13	0,0147
	44,15	205,40	91,24	114,16	108,33	0,0132
	45,58	220,63	93,74	126,89	120,53	0,0119
"T1"	47,00	236,88	96,22	140,66	133,77	0,0106
					TOTAL	0,1061

Fuente. El Autor

Tabla 4.41 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 31.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,20	160,30	76,59	83,71		
	40,17	168,30	85,55	82,75	83,23	0,0117
	41,14	176,68	94,50	82,18	82,47	0,0118
	42,11	185,48	103,45	82,03	82,10	0,0118
	43,08	194,70	112,41	82,29	82,16	0,0118
	44,05	204,37	121,36	83,01	82,65	0,0117
	45,02	214,53	130,31	84,22	83,61	0,0116
"T1"	46,00	225,31	139,36	85,95	85,09	0,0115
					TOTAL	0,0819

Fuente. El Autor

Tabla 4.42 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 32.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	40,30	169,40	76,59	92,81		
	41,08	176,15	82,65	93,50	93,16	0,0084
	41,86	183,17	88,70	94,47	93,99	0,0083
	42,64	190,46	94,75	95,71	95,09	0,0082
	43,42	198,04	100,80	97,24	96,47	0,0081
	44,20	205,90	106,86	99,04	98,14	0,0079
	44,98	214,10	112,91	101,19	100,12	0,0078
"T1"	45,80	223,07	119,27	103,80	102,49	0,0080
					TOTAL	0,0567

Fuente. El Autor

Tabla 4.43 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 33.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	40,30	169,40	76,59	92,81		
	41,08	176,15	81,63	94,52	93,66	0,0083
	41,86	183,17	86,67	96,50	95,51	0,0082
	42,64	190,46	91,71	98,75	97,63	0,0080
	43,42	198,04	96,75	101,29	100,02	0,0078
	44,20	205,90	101,79	104,11	102,70	0,0076
	44,98	214,10	106,83	107,27	105,69	0,0074
"T1"	45,70	221,95	111,48	110,47	108,87	0,0066
					TOTAL	0,0539

Fuente. El Autor

Tabla 4.44 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 34.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	40,00	166,87	76,59	90,28		
	41,08	176,15	82,58	93,57	91,93	0,0117
	41,86	183,17	86,90	96,27	94,92	0,0082
	42,64	190,46	91,22	99,24	97,76	0,0080
	43,42	198,04	95,54	102,50	100,87	0,0077
	44,20	205,90	99,86	106,04	104,27	0,0075
	44,98	214,10	104,18	109,92	107,98	0,0072
"T1"	45,60	220,85	107,62	113,23	111,58	0,0056
					TOTAL	0,0559

Fuente. El Autor

Tabla 4.45 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 35.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,00	158,69	76,59	82,10		
	41,08	176,15	85,56	90,59	86,34	0,0241
	41,86	183,17	88,92	94,25	92,42	0,0084
	42,64	190,46	92,28	98,18	96,21	0,0081
	43,42	198,04	95,64	102,40	100,29	0,0078
	44,20	205,90	99,01	106,90	104,65	0,0075
	44,98	214,10	102,37	111,73	109,31	0,0071
"T1"	45,60	220,85	105,04	115,81	113,77	0,0054
					TOTAL	0,0685

Fuente. El Autor

Tabla 4.46 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 36.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	37,60	147,89	76,59	71,30		
	38,75	156,71	81,06	75,66	73,48	0,0157
	39,90	166,03	85,52	80,51	78,08	0,0147
	41,05	175,89	89,98	85,91	83,21	0,0138
	42,20	186,31	94,44	91,87	88,89	0,0129
	43,35	197,34	98,90	98,44	95,15	0,0121
	44,50	209,02	103,37	105,66	102,05	0,0113
"T1"	45,70	221,95	108,02	113,93	109,79	0,0109
					TOTAL	0,0914

Fuente. El Autor

Tabla 4.47 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 37.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,80	135,01	76,59	58,42		
	37,20	144,93	81,54	63,40	60,91	0,0230
	38,60	155,53	86,48	69,05	66,22	0,0211
	40,00	166,87	91,42	75,45	72,25	0,0194
	41,40	179,00	96,36	82,64	79,05	0,0177
	42,80	191,99	101,30	90,69	86,66	0,0162
	44,20	205,90	106,25	99,66	95,17	0,0147
"T1"	45,60	220,85	111,19	109,66	104,66	0,0134
					TOTAL	0,1255

Fuente. El Autor

Tabla 4.48 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 38.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,00	129,63	76,59	53,04		
	37,20	144,93	83,70	61,23	57,13	0,0385
	38,60	155,53	88,22	67,31	64,27	0,0218
	40,00	166,87	92,74	74,13	70,72	0,0198
	41,40	179,00	97,27	81,74	77,93	0,0180
	42,80	191,99	101,79	90,20	85,97	0,0163
	44,20	205,90	106,31	99,59	94,90	0,0148
"T1"	45,50	219,74	110,51	109,23	104,41	0,0125
					TOTAL	0,1415

Fuente. El Autor

Tabla 4.49 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 39.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	33,30	118,84	76,59	42,25		
	35,03	129,83	81,75	48,08	45,16	0,0383
	36,76	141,74	86,90	54,84	51,46	0,0336
	38,49	154,67	92,06	62,61	58,72	0,0295
	40,22	168,72	97,21	71,51	67,06	0,0258
	41,95	184,00	102,37	81,63	76,57	0,0226
	43,68	200,63	107,53	93,10	87,37	0,0198
"T1"	45,40	218,65	112,65	106,00	99,55	0,0173
					TOTAL	0,1869

Fuente. El Autor

Tabla 4.50 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 40.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	32,80	115,82	76,59	39,23		
	35,03	129,83	82,77	47,06	43,14	0,0517
	36,76	141,74	87,56	54,18	50,62	0,0342
	38,49	154,67	92,35	62,32	58,25	0,0297
	40,22	168,72	97,15	71,57	66,94	0,0258
	41,95	184,00	101,94	82,06	76,82	0,0225
	43,68	200,63	106,73	93,90	87,98	0,0197
"T1"	45,60	220,85	112,05	108,80	101,35	0,0189
					TOTAL	0,2025

Fuente. El Autor

Tabla 4.51 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 41.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	32,70	115,23	76,59	38,64		
	35,03	129,83	82,63	47,20	42,92	0,0543
	36,76	141,74	87,11	54,63	50,92	0,0340
	38,49	154,67	91,59	63,08	58,86	0,0294
	40,22	168,72	96,07	72,65	67,87	0,0255
	41,95	184,00	100,55	83,45	78,05	0,0222
	43,68	200,63	105,03	95,60	89,52	0,0193
"T1"	45,70	221,95	110,26	111,69	103,64	0,0195
					TOTAL	0,2041

Fuente. El Autor

Tabla 4.52 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 42.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	32,60	114,63	76,59	38,04		
	35,03	129,83	82,47	47,36	42,70	0,0569
	36,76	141,74	86,66	55,08	51,22	0,0338
	38,49	154,67	90,85	63,82	59,45	0,0291
	40,22	168,72	95,03	73,69	68,75	0,0252
	41,95	184,00	99,22	84,78	79,23	0,0218
	43,68	200,63	103,41	97,22	91,00	0,0190
"T1"	45,80	223,07	108,54	114,53	105,88	0,0200
					TOTAL	0,2058

Fuente. El Autor

Tabla 4.53 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 43.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	32,60	114,63	76,59	38,04		
	35,03	129,83	82,13	47,70	42,87	0,0567
	36,76	141,74	86,08	55,66	51,68	0,0335
	38,49	154,67	90,02	64,65	60,16	0,0288
	40,22	168,72	93,97	74,75	69,70	0,0248
	41,95	184,00	97,91	86,09	80,42	0,0215
	43,68	200,63	101,86	98,77	92,43	0,0187
"T1"	45,70	221,95	106,46	115,49	107,13	0,0189
					TOTAL	0,2028

Fuente. El Autor

Tabla 4.54 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 44.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	32,60	114,63	76,59	38,04		
	35,03	129,83	81,72	48,11	43,07	0,0564
	36,76	141,74	85,37	56,37	52,24	0,0331
	38,49	154,67	89,02	65,65	61,01	0,0284
	40,22	168,72	92,67	76,05	70,85	0,0244
	41,95	184,00	96,32	87,68	81,86	0,0211
	43,68	200,63	99,97	100,66	94,17	0,0184
"T1"	45,50	219,75	103,81	115,94	108,30	0,0168
					TOTAL	0,1986

Fuente. El Autor

Tabla 4.55 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 45.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,50	162,73	76,59	86,14		
	40,28	168,55	85,63	82,92	84,53	0,0092
	41,06	175,98	94,67	81,31	82,11	0,0095
	41,84	182,99	103,71	79,28	80,29	0,0097
	42,62	190,27	112,75	77,52	78,40	0,0099
	43,40	197,84	121,79	76,05	76,78	0,0102
	44,18	205,70	130,83	74,87	75,46	0,0103
"T1"	45,00	214,32	140,34	73,98	74,42	0,0110
					TOTAL	0,0699

Fuente. El Autor

Tabla 4.56 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 46.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,50	162,73	76,59	86,14		
	40,28	168,55	84,18	84,37	85,25	0,0091
	41,06	175,98	91,77	84,21	84,29	0,0093
	41,84	182,99	99,36	83,63	83,92	0,0093
	42,62	190,27	106,95	83,32	83,47	0,0093
	43,40	197,84	114,54	83,30	83,31	0,0094
	44,18	205,70	122,13	83,57	83,44	0,0093
"T1"	44,60	210,07	126,22	83,85	83,71	0,0050
					TOTAL	0,0608

Fuente. El Autor

Tabla 4.57 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 47.

	°C	H`	H	H`-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	39,10	159,49	76,59	82,90		
	40,28	168,55	86,16	82,39	82,64	0,0143
	41,06	175,98	92,49	83,49	82,94	0,0094
	41,84	182,99	98,81	84,18	83,83	0,0093
	42,62	190,27	105,14	85,13	84,65	0,0092
	43,40	197,84	111,47	86,37	85,75	0,0091
	44,18	205,70	117,79	87,91	87,14	0,0090
"T1"	44,70	211,13	122,01	89,12	88,51	0,0059
					TOTAL	0,0661

Fuente. El Autor

Tabla 4.58 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 48.

	°C	H`	H	H`-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	38,50	154,75	76,59	78,16		
	40,28	168,55	88,96	79,59	78,87	0,0226
	41,06	175,98	94,39	81,60	80,59	0,0097
	41,84	182,99	99,81	83,18	82,39	0,0095
	42,62	190,27	105,23	85,04	84,11	0,0093
	43,40	197,84	110,65	87,19	86,12	0,0091
	44,18	205,70	116,07	89,63	88,41	0,0088
"T1"	44,50	209,03	118,29	90,74	90,18	0,0035
					TOTAL	0,0724

Fuente. El Autor

Tabla 4.59 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 49.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	38,50	154,75	76,59	78,16		
	40,28	168,55	86,22	82,33	80,24	0,0222
	41,06	175,98	90,44	85,54	83,93	0,0093
	41,84	182,99	94,66	88,33	86,93	0,0090
	42,62	190,27	98,88	91,39	89,86	0,0087
	43,40	197,84	103,10	94,74	93,06	0,0084
	44,18	205,70	107,32	98,38	96,56	0,0081
"T1"	44,40	207,98	108,51	99,47	98,92	0,0022
					TOTAL	0,0678

Fuente. El Autor

Tabla 4.60 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 50.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	36,70	141,31	76,59	64,72		
	37,81	149,46	82,00	67,46	66,09	0,0168
	38,92	158,06	87,40	70,66	69,06	0,0161
	40,03	167,12	92,81	74,31	72,48	0,0153
	41,13	176,59	98,17	78,42	76,37	0,0144
	42,24	186,68	103,57	83,11	80,77	0,0137
	43,35	197,34	108,98	88,36	85,73	0,0129
"T1"	44,50	209,03	114,58	94,45	91,41	0,0126
					TOTAL	0,1019

Fuente. El Autor

Tabla 4.61 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 51.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	36,20	137,78	76,59	61,19		
	37,81	149,46	83,71	65,75	63,47	0,0254
	38,92	158,06	88,62	69,44	67,60	0,0164
	40,03	167,12	93,52	73,60	71,52	0,0155
	41,13	176,59	98,38	78,21	75,90	0,0145
	42,24	186,68	103,29	83,39	80,80	0,0137
	43,35	197,34	108,20	89,14	86,27	0,0129
"T1"	44,50	209,03	113,28	95,75	92,45	0,0124
					TOTAL	0,1108

Fuente. El Autor

Tabla 4.62 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 52.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	36,10	137,08	76,59	60,49		
	37,81	149,46	83,52	65,94	63,21	0,0271
	38,92	158,06	88,01	70,05	67,99	0,0163
	40,03	167,12	92,51	74,61	72,33	0,0153
	41,13	176,59	96,96	79,63	77,12	0,0143
	42,24	186,68	101,46	85,22	82,42	0,0135
	43,35	197,34	105,96	91,38	88,30	0,0126
"T1"	44,50	209,03	110,61	98,42	94,90	0,0121
					TOTAL	0,1111

Fuente. El Autor

Tabla 4.63 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 53.

	°C	H'	H	$H' - H$	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	36,00	136,39	76,59	59,80		
	37,81	149,46	83,36	66,10	62,95	0,0288
	38,92	158,06	87,51	70,55	68,32	0,0162
	40,03	167,12	91,67	75,45	73,00	0,0152
	41,13	176,59	95,78	80,81	78,13	0,0141
	42,24	186,68	99,93	86,75	83,78	0,0132
	43,35	197,34	104,08	93,26	90,00	0,0123
"T1"	44,60	210,07	108,76	101,31	97,29	0,0128
					TOTAL	0,1127

Fuente. El Autor

Tabla 4.64 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 54.

	°C	H'	H	$H' - H$	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,40	132,29	76,59	55,70		
	37,81	149,46	84,98	64,48	60,09	0,0401
	38,92	158,06	88,84	69,22	66,85	0,0166
	40,03	167,12	92,71	74,41	71,82	0,0155
	41,13	176,59	96,53	80,06	77,24	0,0142
	42,24	186,68	100,40	86,28	83,17	0,0133
	43,35	197,34	104,26	93,08	89,68	0,0124
"T1"	44,60	210,07	108,61	101,46	97,27	0,0129
					TOTAL	0,1250

Fuente. El Autor

Tabla 4.65 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 55.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	35,20	130,96	76,59	54,37		
	37,81	149,46	85,05	64,41	59,39	0,0439
	38,92	158,06	88,65	69,41	66,91	0,0166
	40,03	167,12	92,24	74,88	72,15	0,0154
	41,13	176,59	95,81	80,78	77,83	0,0141
	42,24	186,68	99,40	87,28	84,03	0,0132
	43,35	197,34	103,00	94,34	90,81	0,0122
"T1"	44,50	209,03	106,73	102,31	98,32	0,0117
					TOTAL	0,1272

Fuente. El Autor

Tabla 4.66 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 56.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	34,70	127,66	76,59	51,07		
	36,11	137,15	80,88	56,27	53,67	0,0263
	37,52	147,29	85,17	62,12	59,20	0,0238
	38,93	158,14	89,45	68,69	65,41	0,0216
	40,34	169,74	93,74	76,00	72,34	0,0195
	41,75	182,16	98,03	84,14	80,07	0,0176
	43,16	195,48	102,31	93,17	88,65	0,0159
"T1"	44,60	210,07	106,69	103,38	98,27	0,0147
					TOTAL	0,1393

Fuente. El Autor

Tabla 4.67 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 57.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	34,50	126,37	76,59	49,78		
	36,11	137,15	81,20	55,95	52,86	0,0305
	37,52	147,29	85,23	62,06	59,01	0,0239
	38,93	158,14	89,26	68,88	65,47	0,0215
	40,34	169,74	93,30	76,44	72,66	0,0194
	41,75	182,16	97,33	84,83	80,64	0,0175
	43,16	195,48	101,36	94,12	89,48	0,0158
"T1"	44,50	209,03	105,19	103,84	98,98	0,0135
					TOTAL	0,1421

Fuente. El Autor

Tabla 4.68 Determinación del número de unidades de transferencia, muestra 58.

	°C	H'	H	H'-H	$\overline{(H' - H)}$	$\frac{dT}{\overline{(H' - H)}}$
		"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"kj/kg"	"°C/(kj /kg)"
"T2"	34,10	123,81	76,59	47,22		
	36,11	137,15	81,90	55,25	51,23	0,0392
	37,52	147,29	85,62	61,67	58,46	0,0241
	38,93	158,14	89,34	68,80	65,23	0,0216
	40,34	169,74	93,07	76,67	72,73	0,0194
	41,75	182,16	96,79	85,37	81,02	0,0174
	43,16	195,48	100,51	94,97	90,17	0,0156
"T1"	44,50	209,03	104,05	104,98	99,97	0,0134
					TOTAL	0,1508

Fuente. El Autor

4.6.4 Determinación de unidades de transferencia

Tabla 4.69 Determinación de unidades de transferencia y tasa global de transferencia máxima.

maire/area	magua/area	NUT	KXA
Kg/sm2	Kg/sm2		Kg/sm3
0,481	1,33	0,2927	0,389
0,572	1,33	0,2544	0,338
0,686	1,33	0,2768	0,368
0,801	1,33	0,3032	0,403
1,030	1,33	0,2839	0,378
1,144	1,33	0,4265	0,567
1,259	1,33	0,4641	0,617
1,373	1,33	0,4653	0,619
1,487	1,33	0,4719	0,628
1,602	1,33	0,5233	0,696
1,716	1,33	0,5325	0,708
1,831	1,33	0,5832	0,776
1,945	1,33	0,5948	0,791
2,105	1,33	0,6313	0,840
0,481	1,06	0,3429	0,363
0,572	1,06	0,2374	0,252
0,686	1,06	0,2255	0,239
0,801	1,06	0,2342	0,248
1,030	1,06	0,2862	0,303
1,144	1,06	0,3828	0,406
1,259	1,06	0,5253	0,557
1,373	1,06	0,5926	0,628
1,487	1,06	0,7823	0,829
1,602	1,06	0,848	0,899
1,716	1,06	0,8546	0,906
1,831	1,06	0,8617	0,913
1,945	1,06	0,8492	0,900
2,105	1,06	0,8316	0,881
0,114	0,88	0,2073	0,182

0,481	0,88	0,1166	0,103
0,572	0,88	0,1268	0,112
0,686	0,88	0,1651	0,145
0,801	0,88	0,2058	0,181
1,030	0,88	0,3065	0,270
1,144	0,88	0,3298	0,290
1,259	0,88	0,4162	0,366
1,373	0,88	0,4202	0,370
1,487	0,88	0,425	0,374
1,602	0,88	0,4188	0,369
1,716	0,88	0,4203	0,370
1,831	0,88	0,4281	0,377
1,945	0,88	0,4363	0,384
2,105	0,88	0,4442	0,391
0,114	0,7074	0,1246	0,088
0,481	0,7074	0,145	0,103
0,572	0,7074	0,2522	0,178
0,686	0,7074	0,2311	0,163
0,801	0,7074	0,2323	0,164
1,030	0,7074	0,1831	0,130
1,144	0,7074	0,2058	0,146
1,259	0,7074	0,1983	0,140
1,373	0,7074	0,2834	0,200
1,487	0,7074	0,3668	0,259
1,602	0,7074	0,3503	0,248
1,716	0,7074	0,3401	0,241
1,831	0,7074	0,3257	0,230
1,945	0,7074	0,3198	0,226
2,105	0,7074	0,3092	0,219

Fuente. El Autor

4.6.5 Pruebas de Hipótesis

4.6.5.1 Hipótesis Específica H1

- Para la comprobación de la hipótesis 1, utilizaremos los datos que se encuentran en las tablas 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9, en las mismas se encuentran datos de ‘velocidad del aire’, ‘flujo másico de agua por unidad de área’ y ‘caída de presión’.

Tabla 4.70 Obtención de datos de caída de presión a 0.7074 kg/sm²

Datos caída de presión a 0.7074 kg/sm ² X2			
TOMA	VELOCIDAD X1	CAÍDA DE PRESIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN Y1
	m/s	lnH ₂ O	Pa
1	0,1	0,040	9,95
2	0,42	0,070	17,42
3	0,5	0,080	19,91
4	0,6	0,090	22,4
5	0,7	0,100	24,89
6	0,9	0,160	39,82
7	1	0,250	62,61
8	1,1	0,270	67,19
9	1,2	0,300	74,65
10	1,3	0,320	79,63
11	1,4	0,400	99,54
12	1,5	0,420	104,51
13	1,6	0,430	107
14	1,7	0,440	109,49
15	1,84	0,620	154,29

Fuente. El Autor

Tabla 4.71 Obtención de datos de caída de presión a 0.88 kg/sm²

Datos caída de presión a 0.88 kg/sm ² X2			
TOMA	VELOCIDAD X1	CAÍDA DE PRESIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN Y1
	m/s	lnH ₂ O	Pa
1	0,1	0,041	10,20
2	0,42	0,072	17,92
3	0,5	0,080	19,90
4	0,6	0,092	22,89
5	0,7	0,100	24,88
6	0,9	0,163	40,56

7	1	0,252	62,70
8	1,1	0,274	68,18
9	1,2	0,310	77,14
10	1,3	0,321	79,88
11	1,4	0,410	102,02
12	1,5	0,425	105,76
13	1,6	0,435	108,25
14	1,7	0,445	110,73
15	1,84	0,630	156,77

Fuente. El Autor

Tabla 4.72 Obtención de datos de caída de presión a 1,06 kg/sm²

Datos caída de presión a 1,06 kg/sm ² X2			
TOMA	VELOCIDAD X1	CAÍDA DE PRESIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN Y1
	m/s	lnH ₂ O	Pa
1	0,1	0,041	10,20
2	0,42	0,074	18,41
3	0,5	0,080	19,91
4	0,6	0,093	23,14
5	0,7	0,110	27,37
6	0,9	0,171	42,55
7	1	0,270	67,19
8	1,1	0,280	69,67
9	1,2	0,330	82,12
10	1,3	0,360	89,58
11	1,4	0,430	107,00
12	1,5	0,440	109,49
13	1,6	0,445	110,70
14	1,7	0,500	124,42
15	1,84	0,690	171,70

Fuente. El Autor

Tabla 4.73 Obtención de datos de caída de presión a 1,33 kg/sm²

Datos caída de presión a 1,33 kg/sm ² X2			
TOMA	VELOCIDAD X1	CAÍDA DE PRESIÓN	CAÍDA DE PRESIÓN Y1
	m/s	lnH ₂ O	Pa
1	0,1	0,050	12,44
2	0,42	0,080	19,90
3	0,5	0,100	24,89
4	0,6	0,150	37,33
5	0,7	0,160	39,82
6	0,9	0,190	47,28
7	1	0,300	74,65
8	1,1	0,320	79,63
9	1,2	0,350	87,09
10	1,3	0,380	94,56
11	1,4	0,450	111,98
12	1,5	0,470	116,95
13	1,6	0,490	121,93
14	1,7	0,580	144,32
15	1,84	0,720	179,16

Fuente. El Autor

Se planteó la hipótesis de investigación H1: La variación en la velocidad del aire generará un cambio en la caída de presión a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento.

Dónde:

X1= Las variaciones en la velocidad del aire

X2=Flujo másico de agua por área

Y1= Generarán un cambio en la caída de presión a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento.

Se necesita un modelo que se ajuste a los datos reales del experimento, el planteado por Cobb-Douglas (como se citó en Villa, 2008), relaciona dos

variables que se ajustan con menos errores posibles, se muestra el modelo matemático:

$$\Delta P = \varphi \cdot v^{\beta_1} \cdot \dot{m}_{agua/area}^{\beta_2}$$

Para bajar los coeficientes se utilizan los logaritmos resultando:

$$\begin{aligned}\log(\Delta P) &= \log(\varphi \cdot v^{\beta_1} \cdot \dot{m}_{agua/area}^{\beta_2}) \\ \log(\Delta P) &= \log(\varphi) + \beta_1 \log(v) + \beta_2 \log(\dot{m}_{agua/area})\end{aligned}$$

Este nuevo modelo se visualiza como una combinación lineal de los logaritmos, el cual resulta sencillo trabajar como un modelo de regresión lineal. Para obtener estimadores insesgados de los coeficientes β 's se utilizará el modelo de Regresión lineal bajo el software IBM-SPSS no sin antes comprobar los supuestos de este modelo.

Para facilitar el proceso de modelamiento se asumirá que el modelo a probar será de la forma:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Donde: $Y_1 = \log(\Delta P)$

$X_1 = \log(v)$

$X_2 = \log(\dot{m}_{agua/area})$

$\beta_0 = \log(\varphi)$

$\varepsilon = \text{Error de estimación.}$

Supuesto de Linealidad

Se supone que debe existir una asociación lineal significativa entre la variable dependiente Y_1 y las variables independientes X_1 y X_2 .

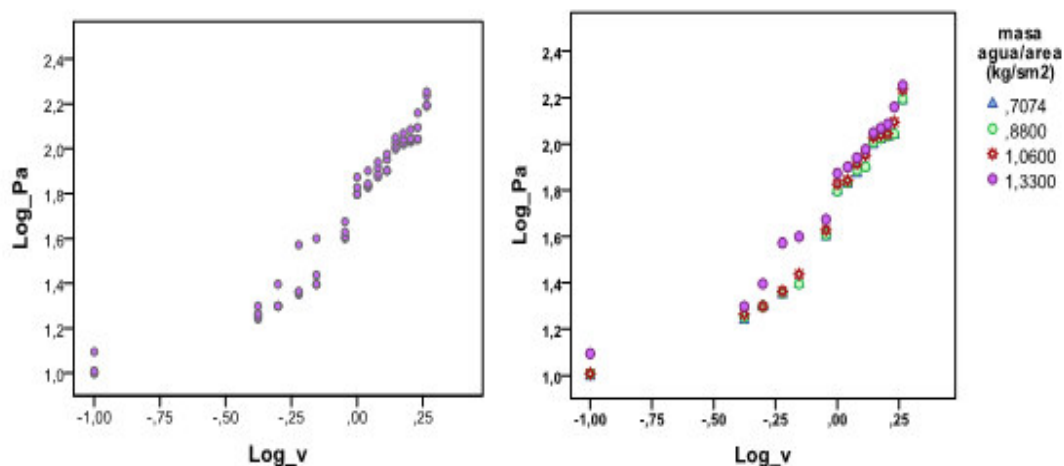


Figura 4.4 Dispersión de Presión con respecto a la Velocidad

Fuente. Propia

En la (Figura 4.4) se muestra que la relación entre el logaritmo de la presión y de la velocidad es lineal con dirección positiva es decir que a mayores velocidades se registran mayores presiones.

A continuación se prueba la significancia del coeficiente de correlación donde la hipótesis nula es que el coeficiente de correlación no es significativo ($H_0: \rho = 0$) en contra la hipótesis alterna que indica lo contrario ($H_1: \rho \neq 0$).

Correlaciones

		Log_v
Log_Pa	Correlación de Pearson	,928
	Sig. (bilateral)	,000
	N	60

Figura 4.5 Correlación entre Log Presión y Velocidad

Fuente. Propia

En la (Figura 4.5) se puede observar que el coeficiente de correlación es muy alto y positivo, $r = 0.928$ con un valor- $p = 0.000$ (Sig.) que es evidencia

para concluir que existe una correlación estadísticamente significativa entre el logaritmo de la presión y el de velocidad.

Este resultado habilita la ejecución de un análisis de regresión, cuyos resultados con SPSS fueron positivos.

Regresión Lineal Múltiple

Los resultados al ejecutar Análisis de Regresión en SPSS se muestran a continuación.

Resumen del modelo^b

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,933 ^a	,871	,867	,12850

a. Variables predictoras: (Constante), Log_m_agua, Log_v

b. Variable dependiente: Log_Pa

ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	6,375	2	3,187	193,041	,000 ^b
	Residual	,941	57	,017		
	Total	7,316	59			

a. Variable dependiente: Log_Pa

b. Variables predictoras: (Constante), Log_m_agua, Log_v

Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	1,798	,017		105,707	,000
	Log_v	1,026	,052	,928	19,544	,000
	Log_m_agua	,333	,164	,096	2,029	,047

a. Variable dependiente: Log_Pa

Figura 4.6 Resultados Análisis Regresión para Cambios de Presión

Fuente. Propia

El *Resumen del modelo* muestra que el R-cuadrado ajustado es de 0.867 lo que indica que este modelo con el logaritmo de velocidad y de masa de agua explican el 86.7% de la variación del logaritmo de cambio de Presión, lo

cual es muy bueno pues este modelo explica la gran mayoría de los casos del cambio de Presión debido a la velocidad y masa de agua.

La tabla *ANOVA* muestra que el valor-p = 0.000 de la prueba F es suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que los coeficientes de este modelo son todos cero ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$) en favor de la hipótesis alterna que indica que al menos un coeficiente no es cero y por ende este modelo es estadísticamente significativo con al menos una de las variables independientes velocidad o masa de agua.

La tabla de *Coeficientes* muestra dos cosas importantes, la primera es la significancia de cada coeficiente por cada variable independiente donde la prueba t-student contrasta las siguientes hipótesis.

$$H_0: \beta_i = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq 0$$

El valor-p = 0.000 de la prueba t del coeficiente de la variable log_v, es evidencia suficiente para inferir que el coeficiente de la variable velocidad es estadísticamente significativo. El valor-p = 0.047 es evidencia estadística para inferir que el coeficiente de la variable masa de agua también es significativo y por lo tanto ambas variables sirven estadísticamente para explicar los cambios de presión.

La parte más importante de la tabla de coeficientes es la estimación insesgada de los coeficientes, los cuales forman la siguiente ecuación de regresión.

$$\hat{Y}_1 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2$$

$$\hat{Y}_1 = 1.798 + 1.026 X_1 + 0.333 X_2$$

Tal como se mencionó anteriormente, este modelo ajusta el 86.7% de los casos reales, lo cual es muy óptimo. Retomando la ecuación original, estos

resultados indican que el cambio de presión se puede expresar mediante el siguiente modelo matemático.

$$\begin{aligned}\log(\Delta P) &= \log(\varphi) + \beta_1 \log(v) + \beta_2 \log(\dot{m}_{agua/area}) \\ \log(\Delta P) &= 1.798 + 1.026 \log(v) + 0.333 \log(\dot{m}_{agua/area}) \\ \Delta P &= \varphi \cdot v^{\beta_1} \cdot \dot{m}_{agua/area}^{\beta_2}\end{aligned}$$

Para obtener el valor de φ hay que aplicar la función inversa de logaritmo, entonces:

$$\varphi = 10^{1.798} = 62.806$$

Por lo tanto

$$\Delta P = 62.81 \cdot v^{1.026} \cdot \dot{m}_{agua/area}^{0.333}$$

En resumen, para definir los coeficientes, son necesarios los valores que se encuentran en la (Tabla 4.74) que se muestra a continuación.

Tabla 4. 74 Coeficientes de regresión de caída de presión.

φ	β_1	β_2
62.81	1.026	0.333

Fuente. El Autor

La prueba de significancia de la correlación, la prueba ANOVA del modelo y las pruebas t-student de los coeficientes brindan evidencia estadística suficiente que demuestran la hipótesis H1 de que las variaciones en la 'velocidad del aire' y en el flujo másico de agua por área generan un cambio en la caída de presión ocasionado por el relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento.

4.6.5.2 Hipótesis Específica H2

- Para la comprobación de la hipótesis 2, utilizaremos los datos que se

encuentran en la tabla 4.75, en la misma se encuentran datos de 'flujo másico de aire por unidad de área' y 'tasa global de transferencia de masa'.

Tabla 4.75 Determinación de unidades de transferencia y tasa global de transferencia máxima.

maire/área X3	magua/área	NUT	KXA Y2
Kg/sm ²	Kg/sm ²		Kg/sm ³
0,481	1,33	0,2927	0,389
0,572	1,33	0,2544	0,338
0,686	1,33	0,2768	0,368
0,801	1,33	0,3032	0,403
1,030	1,33	0,2839	0,378
1,144	1,33	0,4265	0,567
1,259	1,33	0,4641	0,617
1,373	1,33	0,4653	0,619
1,487	1,33	0,4719	0,628
1,602	1,33	0,5233	0,696
1,716	1,33	0,5325	0,708
1,831	1,33	0,5832	0,776
1,945	1,33	0,5948	0,791
2,105	1,33	0,6313	0,840
0,481	1,06	0,3429	0,363
0,572	1,06	0,2374	0,252
0,686	1,06	0,2255	0,239
0,801	1,06	0,2342	0,248
1,030	1,06	0,2862	0,303
1,144	1,06	0,3828	0,406
1,259	1,06	0,5253	0,557
1,373	1,06	0,5926	0,628
1,487	1,06	0,7823	0,829
1,602	1,06	0,848	0,899
1,716	1,06	0,8546	0,906
1,831	1,06	0,8617	0,913
1,945	1,06	0,8492	0,900
2,105	1,06	0,8316	0,881
0,114	0,88	0,2073	0,182
0,481	0,88	0,1166	0,103
0,572	0,88	0,1268	0,112
0,686	0,88	0,1651	0,145
0,801	0,88	0,2058	0,181
1,030	0,88	0,3065	0,270
1,144	0,88	0,3298	0,290
1,259	0,88	0,4162	0,366

1,373	0,88	0,4202	0,370
1,487	0,88	0,425	0,374
1,602	0,88	0,4188	0,369
1,716	0,88	0,4203	0,370
1,831	0,88	0,4281	0,377
1,945	0,88	0,4363	0,384
2,105	0,88	0,4442	0,391
0,114	0,7074	0,1246	0,088
0,481	0,7074	0,145	0,103
0,572	0,7074	0,2522	0,178
0,686	0,7074	0,2311	0,163
0,801	0,7074	0,2323	0,164
1,030	0,7074	0,1831	0,130
1,144	0,7074	0,2058	0,146
1,259	0,7074	0,1983	0,140
1,373	0,7074	0,2834	0,200
1,487	0,7074	0,3668	0,259
1,602	0,7074	0,3503	0,248
1,716	0,7074	0,3401	0,241
1,831	0,7074	0,3257	0,230
1,945	0,7074	0,3198	0,226
2,105	0,7074	0,3092	0,219

Fuente. El Autor

Se planteó la hipótesis de investigación H2: La variación en el flujo másico del aire por unidad de área generará un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento.

Dónde:

X3= La variación en el flujo másico del aire por unidad de área

Y2= Generará un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento.

Para demostrar esta hipótesis, primero se va a demostrar que existe una correlación significativa entre el flujo másico de aire (m_{aire}) y tasa global de transferencia de masa (KXA), no sin antes evidenciar que existe una asociación lineal entre ambas variables en un gráfico de dispersión.

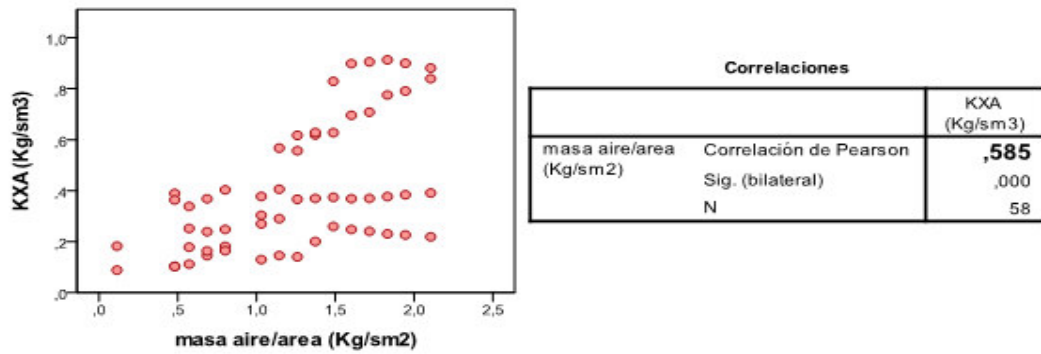


Figura 4.7 Dispersión y Correlación entre flujo másico de aire y tasa transferencia de masa.

Fuente. El Autor

El gráfico de dispersión de la (Figura 4.7) y el coeficiente de correlación $r = 0.585$ muestran la existencia de una asociación lineal positiva con un ajuste moderado, lo cual indica que la relación entre 'flujo másico de aire por unidad de área' y la tasa global de transferencia de masa (KXA) es directa, es decir que a mayor flujo másico de aire mayor será la transferencia de masa. Al contrastar la hipótesis de la significancia de la correlación:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

El valor- $p = 0.000$ (Sig. bilateral) es evidencia suficiente para concluir que la correlación entre flujo másico de aire y tasa de transferencia de masa es estadísticamente significativa.

Una vez demostrada la correlación significativa se procede a demostrar la dependencia o independencia entre flujo másico de aire y tasa de transferencia de masa, para lo cual se ejecuta un análisis de regresión lineal utilizando el paquete estadístico SPSS configurando la variable tasa transferencia de masa (KXA) como variable dependiente y flujo másico de aire (m_{aire}) como variable independiente, planteando como modelo lineal directo:

$$KXA = \beta_0 + \beta_1(m_{aire}) + \varepsilon$$

Se obtuvieron buenos resultados.

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,585 ^a	,342	,330	,204569

a. Variables predictoras: (Constante), masa aire/area (Kg/sm2)

Coeficientes ^a					
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	,070	,068		1,043	,302
masa aire/area (Kg/sm2)	,268	,050	,585	5,391	,000

a. Variable dependiente: KXA (Kg/sm3)

Figura 4.8 Análisis de Regresión 'Tasa de transferencia de masa' vs. 'Flujo Másico de aire'
Fuente. El Autor

La tabla de coeficientes en la (Figura 4.8) muestra en su última columna el valor-p de la significancia de cada coeficiente y muestra que el valor-p del coeficiente de masa de aire es 0.000 indicando que se rechaza la hipótesis nula de que el coeficiente es cero en favor de la hipótesis alterna de que no es cero, concluyendo que existe evidencia estadística suficiente para inferir que el 'Flujo másico de aire por unidad de área' causa cambios en la tasa global de transferencia de masa (KXA) y con esto queda demostrada la hipótesis H2.

4.6.5.3 Hipótesis Específica H3

- Para la comprobación de la hipótesis 3, utilizaremos los datos que se encuentran en la tabla 4.76, en la misma se encuentran datos de 'flujo másico de agua por unidad de área' y 'tasa global de transferencia de masa'.

Tabla 4.76 Determinación de unidades de transferencia y tasa global de transferencia máxima.

maire/área	magua/área X2	NUT	KXA Y2
Kg/sm ²	Kg/sm ²		Kg/sm ³
0,481	1,33	0,2927	0,389
0,572	1,33	0,2544	0,338
0,686	1,33	0,2768	0,368
0,801	1,33	0,3032	0,403
1,030	1,33	0,2839	0,378
1,144	1,33	0,4265	0,567
1,259	1,33	0,4641	0,617
1,373	1,33	0,4653	0,619
1,487	1,33	0,4719	0,628
1,602	1,33	0,5233	0,696
1,716	1,33	0,5325	0,708
1,831	1,33	0,5832	0,776
1,945	1,33	0,5948	0,791
2,105	1,33	0,6313	0,840
0,481	1,06	0,3429	0,363
0,572	1,06	0,2374	0,252
0,686	1,06	0,2255	0,239
0,801	1,06	0,2342	0,248
1,030	1,06	0,2862	0,303
1,144	1,06	0,3828	0,406
1,259	1,06	0,5253	0,557
1,373	1,06	0,5926	0,628
1,487	1,06	0,7823	0,829
1,602	1,06	0,848	0,899
1,716	1,06	0,8546	0,906
1,831	1,06	0,8617	0,913
1,945	1,06	0,8492	0,900
2,105	1,06	0,8316	0,881
0,114	0,88	0,2073	0,182
0,481	0,88	0,1166	0,103
0,572	0,88	0,1268	0,112
0,686	0,88	0,1651	0,145
0,801	0,88	0,2058	0,181
1,030	0,88	0,3065	0,270
1,144	0,88	0,3298	0,290
1,259	0,88	0,4162	0,366
1,373	0,88	0,4202	0,370
1,487	0,88	0,425	0,374
1,602	0,88	0,4188	0,369
1,716	0,88	0,4203	0,370
1,831	0,88	0,4281	0,377
1,945	0,88	0,4363	0,384

2,105	0,88	0,4442	0,391
0,114	0,7074	0,1246	0,088
0,481	0,7074	0,145	0,103
0,572	0,7074	0,2522	0,178
0,686	0,7074	0,2311	0,163
0,801	0,7074	0,2323	0,164
1,030	0,7074	0,1831	0,130
1,144	0,7074	0,2058	0,146
1,259	0,7074	0,1983	0,140
1,373	0,7074	0,2834	0,200
1,487	0,7074	0,3668	0,259
1,602	0,7074	0,3503	0,248
1,716	0,7074	0,3401	0,241
1,831	0,7074	0,3257	0,230
1,945	0,7074	0,3198	0,226
2,105	0,7074	0,3092	0,219

Fuente. El Autor

Se planteó la hipótesis de investigación H3: La variación en el flujo másico de agua por unidad de área generará un cambio en la 'tasa global de transferencia de masa' a través del 'relleno alternativo' del prototipo de torre de enfriamiento.

Dónde:

X2= La variación en el flujo másico de agua por unidad de área

Y2= Generará un cambio en la 'tasa global de transferencia de masa' a través del 'relleno alternativo' del prototipo de torre de enfriamiento.

Al igual que en la demostración de H2, para demostrar esta hipótesis primero se va a demostrar que existe una correlación significativa entre el flujo másico de agua (m_{agua}) y tasa global de transferencia de masa' (KXA), no sin antes evidenciar que existe una asociación lineal entre las dos variables en un gráfico de dispersión.

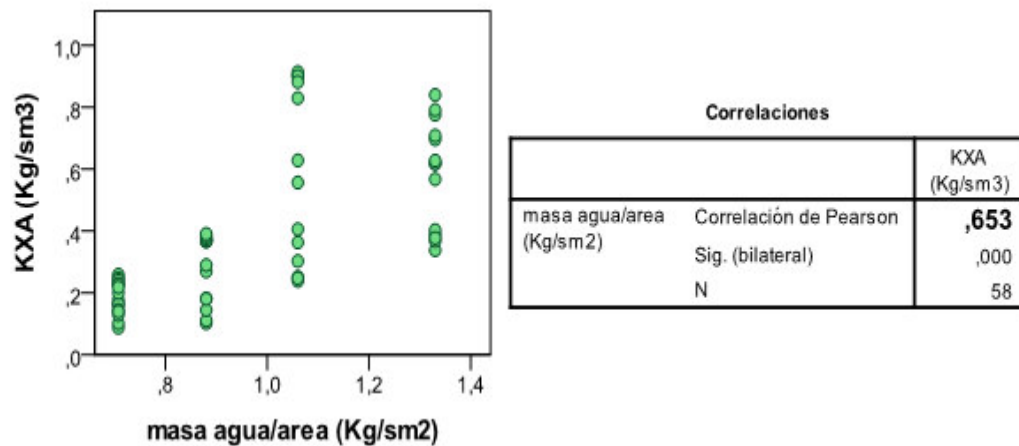


Figura 4.9 *Dispersión y Correlación entre flujo másico de agua y tasa transferencia de masa*
Fuente. El Autor

El gráfico de dispersión de la (Figura 4.9) y el coeficiente de correlación $r = 0.653$ muestran la existencia de una asociación lineal positiva con un ajuste moderado, lo cual indica que la relación entre ‘flujo másico de agua por unidad de área’ y la ‘tasa global de transferencia de masa’ (KXA) es directa, es decir que a mayor flujo másico de agua mayor será la transferencia de masa. Al contrastar la hipótesis de la significancia de la correlación:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

El valor- $p = 0.000$ (Sig. bilateral) es evidencia suficiente para concluir que la correlación entre flujo másico de agua y tasa de transferencia de masa es estadísticamente significativa.

Una vez demostrada la correlación significativa se procede a demostrar la dependencia o independencia entre flujo másico de agua y tasa de transferencia de masa, para lo cual se ejecuta un análisis de regresión lineal utilizando el paquete estadístico SPSS configurando la variable tasa transferencia de masa (KXA) como variable dependiente y flujo másico de agua (m_agua) como variable independiente, planteando como modelo lineal directo:

$$KXA = \beta_0 + \beta_1(\dot{m}_{agua}) + \varepsilon$$

Al igual que en el caso del flujo másico de aire, en este caso con el flujo másico de agua se obtuvieron buenos resultados sobre la relación con tasa de transferencia de masa.

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,653 ^a	,427	,417	,190849

a. Variables predictoras: (Constante), masa agua/area (Kg/sm2)

Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	-,291	,111		-2,631	,011
	masa agua/area (Kg/sm2)	,704	,109	,653	6,460	,000

a. Variable dependiente: KXA (Kg/sm3)

Figura 4.10 Análisis de Regresión 'Tasa de transferencia de masa' vs. 'Flujo Másico de agua'
Fuente. El Autor

La tabla de coeficientes en la (Figura 4.10) muestra que el valor-p del coeficiente de masa de agua es 0.000 indicando que la probabilidad de que la hipótesis nula de que ese coeficiente β_1 sea nada significativo, es casi de cero por lo que se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alterna de que el coeficiente β_1 es significativo, concluyendo que existe evidencia estadística suficiente para inferir que el Flujo másico de agua por unidad de área causa cambios en la tasa global de transferencia de masa (KXA) y con esto queda demostrada la hipótesis H3.

4.6.5.4 Hipótesis Específica H4

- Para la comprobación de la hipótesis 4, utilizaremos los datos que se encuentran en la tabla 4.77, en la misma se encuentran datos de 'flujo másico de agua por unidad de área', 'flujo másico de aire por unidad de área' y 'tasa global de transferencia de masa'.

Tabla 4.77 Determinación de unidades de transferencia y tasa global de transferencia máxima.

maire/área X3	magua/área X2	NUT	KXA Y2
Kg/sm ²	Kg/sm ²		Kg/sm ³
0,481	1,33	0,2927	0,389
0,572	1,33	0,2544	0,338
0,686	1,33	0,2768	0,368
0,801	1,33	0,3032	0,403
1,030	1,33	0,2839	0,378
1,144	1,33	0,4265	0,567
1,259	1,33	0,4641	0,617
1,373	1,33	0,4653	0,619
1,487	1,33	0,4719	0,628
1,602	1,33	0,5233	0,696
1,716	1,33	0,5325	0,708
1,831	1,33	0,5832	0,776
1,945	1,33	0,5948	0,791
2,105	1,33	0,6313	0,840
0,481	1,06	0,3429	0,363
0,572	1,06	0,2374	0,252
0,686	1,06	0,2255	0,239
0,801	1,06	0,2342	0,248
1,030	1,06	0,2862	0,303
1,144	1,06	0,3828	0,406
1,259	1,06	0,5253	0,557
1,373	1,06	0,5926	0,628
1,487	1,06	0,7823	0,829
1,602	1,06	0,848	0,899
1,716	1,06	0,8546	0,906
1,831	1,06	0,8617	0,913
1,945	1,06	0,8492	0,900
2,105	1,06	0,8316	0,881
0,114	0,88	0,2073	0,182
0,481	0,88	0,1166	0,103
0,572	0,88	0,1268	0,112
0,686	0,88	0,1651	0,145
0,801	0,88	0,2058	0,181
1,030	0,88	0,3065	0,270
1,144	0,88	0,3298	0,290
1,259	0,88	0,4162	0,366
1,373	0,88	0,4202	0,370
1,487	0,88	0,425	0,374
1,602	0,88	0,4188	0,369
1,716	0,88	0,4203	0,370

1,831	0,88	0,4281	0,377
1,945	0,88	0,4363	0,384
2,105	0,88	0,4442	0,391
0,114	0,7074	0,1246	0,088
0,481	0,7074	0,145	0,103
0,572	0,7074	0,2522	0,178
0,686	0,7074	0,2311	0,163
0,801	0,7074	0,2323	0,164
1,030	0,7074	0,1831	0,130
1,144	0,7074	0,2058	0,146
1,259	0,7074	0,1983	0,140
1,373	0,7074	0,2834	0,200
1,487	0,7074	0,3668	0,259
1,602	0,7074	0,3503	0,248
1,716	0,7074	0,3401	0,241
1,831	0,7074	0,3257	0,230
1,945	0,7074	0,3198	0,226
2,105	0,7074	0,3092	0,219

Fuente. El Autor

Se planteó la hipótesis de investigación H4: Las variaciones en el flujo másico de agua por unidad de área y en el 'flujo másico del aire por unidad de área' generará un cambio en la 'tasa global de transferencia de masa' a través del 'relleno alternativo' del prototipo de torre de enfriamiento.

Dónde:

X2= Las variaciones en el flujo másico de agua por unidad de área

X3= Las variaciones en el flujo másico del aire por unidad de área

Y2= Generará un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento.

Para demostrar esta hipótesis se debe encontrar un modelo que se ajuste a los datos reales del experimento, hubo que seleccionar el modelo dado por Cobb-Douglas, el cual relaciona dos variables ajustadas con menos errores posibles, se presenta el modelo matemático:

$$KXA = \theta \cdot \dot{m}_{agua/area}^{\alpha_1} \cdot \dot{m}_{aire/area}^{\alpha_2}$$

Donde

$\theta, \alpha_1, \alpha_2$ = coeficientes dependientes de la tipificación y disposición del relleno

$\dot{m}_{agua/area}$ = 'Flujo másico de agua por unidad de área' (kg/s m²)

$\dot{m}_{aire/area}$ = 'Flujo másico de aire por unidad de área' (kg/s m²)

Para obtener estimadores de los coeficientes α , β_3 y β_4 primero se transforma la expresión de KXA a una ecuación lineal utilizando logaritmos de ambos lados de la expresión resultando:

$$\log(KXA) = \log \theta + \alpha_1 \log(\dot{m}_{agua/area}) + \alpha_2 \log(\dot{m}_{aire/area})$$

Luego esta expresión se puede tratar como un modelo de regresión lineal múltiple analizándola de la siguiente forma:

$$Y_2 = \alpha_0 + \alpha_1 X_2 + \alpha_2 X_3 + \varepsilon$$

Donde

$$Y_2 = \log(KXA)$$

$$\alpha_0 = \log \theta$$

$$X_2 = \log(\dot{m}_{agua/area})$$

$$X_3 = \log(\dot{m}_{aire/area})$$

ε = Error de estimación del modelo

Para poder correr el modelo de regresión lineal múltiple es necesario demostrar los supuestos, el primer supuesto de linealidad ya se ha demostrado cuando se demostraron las hipótesis H2 y H3.

Multicolinealidad

Se supone que no debe existir una correlación fuerte entre las variables independientes del modelo, en este caso X_2 y X_3 , para lo cual se realiza un gráfico de dispersión y la prueba de significancia de la correlación entre estas dos variables.

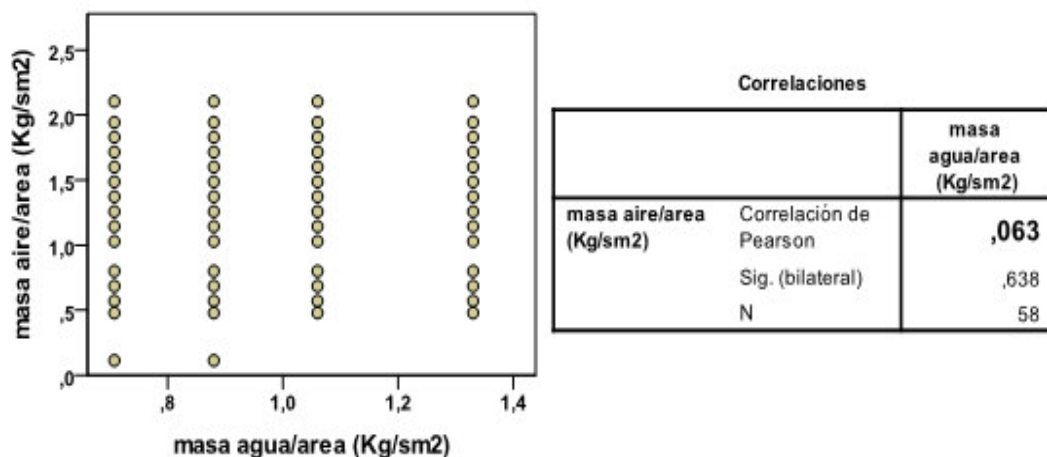


Figura 4.11 *Dispersión y Correlación entre ‘flujo másico de agua’ y ‘flujo másico de aire’.*

Fuente. *El Autor*

El gráfico de dispersión entre ‘flujo másico de agua’ y ‘flujo másico de aire’ no muestra una relación clara, el coeficiente de correlación $r = 0.063$ es muy bajo (cercano a cero) y el valor- $p = 0.638$ de la prueba de significancia de la correlación entre ‘flujo másico de agua’ y ‘flujo másico de aire’ indica que existe una probabilidad alta que la correlación sea nula por lo tanto se concluye que la correlación débil que existe no es estadísticamente significativa, lo que valida ejecutar el análisis de regresión lineal múltiple entre KXA y flujo másico de agua y aire.

Regresión Lineal Múltiple

Los resultados de SPSS al correr el análisis de regresión múltiple son los siguientes:

Variables introducidas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	log_m_aire, log_m_agua ^b	.	Introducir

a. Variable dependiente: log_KXA

b. Todas las variables solicitadas introducidas.

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,887 ^a	,786	,778	,13208

a. Variables predictoras: (Constante), log_m_aire, log_m_agua

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	3,524	2	1,762	100,994	,000 ^b
	Residual	,959	55	,017		
	Total	4,483	57			

a. Variable dependiente: log_KXA

b. Variables predictoras: (Constante), log_m_aire, log_m_agua

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	-,465	,018		-26,129	,000
	log_m_agua	1,833	,173	,666	10,610	,000
	log_m_aire	,536	,065	,516	8,225	,000

a. Variable dependiente: log_KXA

Figura 4.12 Resultados Análisis Regresión para la Tasa global de transferencia de masa.

Fuente. El Autor

El *Resumen del modelo* muestra que el R-cuadrado ajustado es de 0.778 lo que indica que este modelo con el logaritmo de flujo másico de agua y de aire explican juntos el 77.8% de la variación del logaritmo de Tasa Global de Transferencia de masa, lo cual es muy bueno pues este modelo explica la gran mayoría de los casos de la 'Tasa global de transferencia de masa' utilizando el 'flujo másico de agua y de aire por unidad de área'.

La tabla *ANOVA* muestra un valor- $p = 0.000$ (Sig.) de la prueba F que es suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que los coeficientes de este modelo son todos cero ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$) en favor de la hipótesis alterna que indica que al menos un coeficiente no es cero y por ende

este modelo es estadísticamente significativo con al menos una de las variables independientes de flujo másico de agua o aire.

La tabla *Coeficientes* muestra dos cosas importantes, la primera es la significancia de cada coeficiente por cada variable independiente donde la prueba t-student contrasta las siguientes hipótesis.

$$H_0: \alpha_i = 0$$

$$H_1: \alpha_i \neq 0$$

El valor-p = 0.000 de la prueba t del coeficiente de la variable log_m_agua, es evidencia suficiente para inferir que el coeficiente de la variable flujo másico de agua es estadísticamente significativo. El valor-p = 0.000 de la prueba t del coeficiente de la variable log_m_aire es evidencia estadística suficiente para inferir que el coeficiente de la variable flujo másico de aire también es significativo y por lo tanto las variables flujo másico de agua y aire sirven estadísticamente para explicar la Tasa global de transferencia de masa.

La parte más importante de la tabla de coeficientes es la estimación insesgada de los coeficientes, los cuales forman la siguiente ecuación de regresión.

$$\hat{Y}_2 = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 X_2 + \hat{\alpha}_2 X_3$$

$$\hat{Y}_2 = -0.465 + 1.833 X_2 + 0.536 X_3$$

Tal como se mencionó anteriormente, este modelo ajusta el 77.8% de los casos reales, lo cual es muy óptimo al explicar la gran mayoría de casos (mayor a 75%).

Retomando la ecuación original, estos resultados indican que la Tasa de transferencia de masa se puede expresar mediante el siguiente modelo matemático.

$$\log(KXA) = \log \theta + \alpha_1 \log(\dot{m}_{agua/area}) + \alpha_2 \log(\dot{m}_{aire/area})$$

$$\log(KXA) = -0.465 + 1.833 \log(\dot{m}_{agua/area}) + 0.536 \log(\dot{m}_{aire/area})$$

Para poder regresar al modelo original

$$KXA = \theta \cdot \dot{m}_{agua/area}^{\alpha_1} \cdot \dot{m}_{aire/area}^{\alpha_2}$$

Hay que aplicar la función inversa de logaritmo, entonces:

$$\theta = 10^{-0.465} = 0.343$$

Por lo tanto:

$$KXA = 0.343 (m_{agua/area})^{1.833} (m_{aire/area})^{0.536}$$

En resumen, para definir los coeficientes de la ‘Tasa de transferencia de masa’, son necesarios los valores que se encuentran en la (Tabla 4.78) que se muestra a continuación.

Tabla 4.78 Coeficientes de regresión de tasa global de transferencia de masa

θ	α_1	α_2
0.343	1.833	0.536

Fuente. El Autor

La prueba de significancia de la correlación, la prueba ANOVA del modelo y las pruebas t-student de los coeficientes brindan evidencia estadística suficiente que demuestran la hipótesis H4 de que las variaciones en el ‘flujo másico de agua y de aire por unidad de área’, genera un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través del ‘relleno alternativo’ del prototipo de torre de enfriamiento.

CAPÍTULO 5: IMPACTOS - ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CON RELLENO ALTERNATIVO

Es conveniente proceder a realizar el análisis económico de la implementación del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo, a partir del cual se pretende demostrar el impacto económico del uso de materiales reciclados en las torres de enfriamiento. Asimismo, se detallan los cálculos relacionados a la inversión del prototipo de la torre de enfriamiento, los costos y gastos asociados a su operación y los beneficiarios de la misma.

5.1 Inversión del prototipo de la torre de enfriamiento.

La inversión recoge todos los costos necesarios para la implementación de un proyecto, en este caso para la implementación de un prototipo de una torre de enfriamiento. Asimismo, la vida útil de un proyecto se encuentra asociado a la obsolescencia del activo principal la misma que corresponde a 5 años.

5.1.1 Inversión en la implementación de un prototipo de torre de enfriamiento con relleno estándar

Con el fin de determinar el impacto económico del uso de relleno reciclado en las torres de enfriamiento se procedió a estimar en primer lugar, la inversión de un prototipo de torre de enfriamiento con relleno estándar, es decir la inversión en la cual se incurriría de no existir la presente investigación.

A continuación, se detalla la inversión en materiales, insumos y mano de obra para la construcción de la misma:

Tabla 5.1 Materiales para la construcción del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar sin IVA.

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD) ¹
Plancha galvanizada 3 mm.	2	Unidad	USD 60.32	USD 120.64
Tubo galvanizado 1 1/2"	2	Unidad	USD 20.00	USD 40.00
Plancha de acero inoxidable 1.5 mm	2	Unidad	USD 117.87	USD 235.74
Angulo de acero inoxidable 2"	2	Unidad	USD 40.00	USD 80.00
Malla de acero inoxidable	1	Unidad	USD 30.00	USD 30.00
Plancha perforada	1	Unidad	USD 20.00	USD 20.00
Acrílico	1	Unidad	USD 20.00	USD 20.00
Total de inversión en los materiales para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno estándar.				USD 546.38

Fuente. El Autor

Tabla 5.2 Insumos para la construcción del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD) ²
Adhesivos.	4	Sobre	USD 1.00	USD 4.00
Bomba centrífuga.	1	Unidad	USD 100.00	USD 100.00
Breaker de 30 A.	1	Unidad	USD 15.00	USD 15.00
Caja eléctrica. 20 x 20 x 10	1	Unidad	USD 30.00	USD 30.00
Codo de PVC de 1/2"	6	Unidad	USD 0.40	USD 2.40
Codo de PVC reducción de 3/4" x 1/2"	2	Unidad	USD 1.20	USD 2.40
Tee de PVC de 1/2".	1	Unidad	USD 0.80	USD 0.80
Relleno	2	Unidad	USD 250.00	USD 500.00
Tee de PVC de 1" x ramal de 3/4"	1	Unidad	USD 2.20	USD 2.20
Enchufe.	1	Unidad	USD 2.00	USD 2.00
Flotador de 1/2"	1	Unidad	USD 18.00	USD 18.00

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD) ²
Galón de laca.	1	Galón	USD 15.00	USD 15.00
Galón de pintura.	1	Galón	USD 14.00	USD 14.00
Interruptores.	3	Unidad	USD 2.00	USD 6.00
Litro de diluyente.	1	Litro	USD 2.00	USD 2.00
Manómetro diferencial.	1	Unidad	USD 300.00	USD 300.00
Permatex.	1	Unidad	USD 3.36	USD 3.36
Perno hexagonal galvanizado de 1/4" x 3/4"	30	Unidad	USD 0.05	USD 1.50
Psicrómetro digital.	1	Unidad	USD 320.00	USD 320.00
Calentador de agua 120 litros.	1	Unidad	USD 342.00	USD 342.00
Rollos teflón	6	Unidad	USD 0.50	USD 3.00
Flujometro	1	Unidad	USD 900.00	USD 900.00
Ventilador Siemens 1800 cfm.	1	Unidad	USD 480.00	USD 480.00
Control de temperatura digital	2	Unidad	USD 95.00	USD 190.00
Tubería PVC de 1/2" x 6 m.	1	Unidad	USD 6.00	USD 6.00
Termocupla j 450	2	Unidad	USD 15.00	USD 30.00
Tuerca hexagonal galvanizada de 3/8"	12	Unidad	USD 0.08	USD 0.96
Válvula de bola de 1/2"	2	Unidad	USD 4.00	USD 8.00
Variador de velocidad	1	Unidad	USD 180.00	USD 180.00
Tapón de PVC de 1/2"	1	Unidad	USD 0.40	USD 0.40
Anemómetro	1	Unidad	USD 120.00	USD 120.00
Total de inversión en los insumos para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno estándar.				USD 3,599.02

Fuente. El Autor

Tabla 5.3 Mano de obra para la construcción del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar

Descripción	Valor total (USD)
Salario personal para construcción de la torre de enfriamiento con relleno estándar.	USD 792.00

Fuente. El Autor

En resumen, la inversión en la cual se incurriría para la construcción del

prototipo de la torre de enfriamiento sin la presente investigación sería el siguiente:

Tabla 5.4 Inversión para la construcción del prototipo.

Inversión	Sin IVA	Con IVA
Materiales para construcción de la torre de enfriamiento con relleno estándar.	USD 546.38	USD 611.95
Insumos para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno estándar.	USD 3,599.02	USD 4,030.90
Salarios del personal para construcción de la torre de enfriamiento con relleno estándar.	USD 792.00	USD 792.00
Total de inversión para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno estándar.	USD 4,937.40	USD 5,434.85

Fuente. El Autor

5.1.2 Inversión en la implementación de un prototipo de torre de enfriamiento con relleno alternativo

En segundo lugar, se procedió a estimar la inversión del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo propuesto en la presente investigación.

La misma que se detalla a continuación:

Tabla 5.5 Materiales para la construcción del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Plancha galvanizada 3 mm.	2	Unidad	USD 60.32	USD 120.64
Tubo galvanizado 1 1/2"	2	Unidad	USD 20.00	USD 40.00
Plancha de acero inoxidable 1.5 mm	2	Unidad	USD 117.87	USD 235.74
Angulo de acero inoxidable 2"	2	Unidad	USD 40.00	USD 80.00
Malla de acero inoxidable	1	Unidad	USD 30.00	USD 30.00
Plancha perforada	1	Unidad	USD 20.00	USD 20.00
Acrílico	1	Unidad	USD 20.00	USD 20.00
Total de inversión en los materiales para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.				USD 546.38

Fuente. El Autor

Tabla 5.6 Insumos para la construcción del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Adhesivos.	4	Sobre	USD 1.00	USD 4.00
Bomba centrífuga.	1	Unidad	USD 100.00	USD 100.00
Breaker de 30 A.	1	Unidad	USD 15.00	USD 15.00
Caja eléctrica.20 x 20 x 10	1	Unidad	USD 30.00	USD 30.00
Codo de PVC de 1/2"	6	Unidad	USD 0.40	USD 2.40
Codo de PVC reducción de 3/4" x 1/2"	2	Unidad	USD 1.20	USD 2.40
Tee de PVC de 1/2".	1	Unidad	USD 0.80	USD 0.80
Relleno	2	Unidad	USD 40.00	USD 80.00
Tee de PVC de 1" x ramal de 3/4"	1	Unidad	USD 2.20	USD 2.20
Enchufe.	1	Unidad	USD 2.00	USD 2.00
Flotador de 1/2"	1	Unidad	USD 18.00	USD 18.00
Galón de laca.	1	Galón	USD 15.00	USD 15.00
Galón de pintura.	1	Galón	USD 14.00	USD 14.00
Interruptores.	3	Unidad	USD 2.00	USD 6.00
Litro de diluyente.	1	Litro	USD 2.00	USD 2.00
Manómetro diferencial.	1	Unidad	USD 300.00	USD 300.00
Permatex.	1	Unidad	USD 3.36	USD 3.36
Perno hexagonal galvanizado de 1/4" x 3/4"	30	Unidad	USD 0.05	USD 1.50
Psicrómetro digital.	1	Unidad	USD 320.00	USD 320.00
Calentador de agua 120 litros.	1	Unidad	USD 342.00	USD 342.00
Rollos teflón	6	Unidad	USD 0.50	USD 3.00
Flujometro	1	Unidad	USD 900.00	USD 900.00
Ventilador Siemens 1800 cfm.	1	Unidad	USD 480.00	USD 480.00
Control de temperatura digital	2	Unidad	USD 95.00	USD 190.00
Tubería PVC de 1/2" x 6 m.	1	Unidad	USD 6.00	USD 6.00
Termocupla j 450	2	Unidad	USD 15.00	USD 30.00
Tuerca hexagonal galvanizada de 3/8"	12	Unidad	USD 0.08	USD 0.96
Válvula de bola de 1/2"	2	Unidad	USD 4.00	USD 8.00
Variador de velocidad	1	Unidad	USD 180.00	USD 180.00
Tapón de PVC de 1/2"	1	Unidad	USD 0.40	USD 0.40
Anemómetro	1	Unidad	USD 120.00	USD 120.00
Total de inversión en los insumos para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.				USD 3,179.02

Fuente. El Autor

Tabla 5.7 Mano de obra para la construcción del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo

Descripción	Valor total (USD)
Mano de obra para construcción de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.	USD 792.00

Fuente. El Autor

La inversión necesaria para la construcción del prototipo de la torre de enfriamiento propuesta en la presente investigación sería el siguiente:

Tabla 5.8 Inversión del prototipo de la torre de enfriamiento de la presente investigación

Inversión	Sin IVA	Con IVA
Materiales para construcción de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.	USD 546.38	USD 611.95
Insumos para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.	USD 3,179.02	USD 3,560.50
Salarios del personal para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.	USD 792.00	USD 792.00
Total de inversión para la construcción de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.	USD 4,517.40	USD 4,964.45

Fuente. El Autor

A partir de la comparación del monto de la inversión del prototipo de la torre de enfriamiento con el relleno alternativo propuesto en la presente investigación y el prototipo de la torre de enfriamiento con materiales estándar se puede observar que, producto de la utilización del relleno alternativo, el monto de la inversión del prototipo propuesto en la presente investigación es menor a la que costaría en caso de que la misma no hubiera sido propuesta, tal como se detalla a continuación:

Tabla 5.9 Total de inversión para la torre de enfriamiento

Inversión	Con relleno estándar	Con relleno alternativo
Materiales para construcción de la torre de enfriamiento.	USD 611.95	USD 611.95
Insumos para la construcción de la torre de enfriamiento.	USD 4,030.90	USD 3,560.50
Salarios del personal para la construcción de la torre de enfriamiento.	USD 792.00	USD 792.00
Total de inversión para la construcción de la torre de enfriamiento.	USD 5,434.85	USD 4,964.45

Fuente. El Autor

Al respecto, cabe indicar que, si bien la variación del monto de la inversión no es muy significativa, esto es debido a que la presente estimación corresponde únicamente a un prototipo de una torre de enfriamiento industrial.

Tal como se detalló en las secciones anteriores, la inversión en la implementación de una torre de enfriamiento industrial es muy elevada, sobre todo en los insumos para la construcción de la misma. Por lo cual, de construirse una torre industrial con el relleno alternativo propuesto en la presente investigación, la reducción en el monto de inversión sería significativamente mayor a la evidenciada, siendo una alternativa atractiva para las empresas industriales que deseen implementar torres de enfriamiento con el relleno alternativo propuesto en esta investigación.

5.2 Costos de operación y mantenimiento del prototipo de la torre de enfriamiento

Al igual que la sección anterior, a continuación se procede a detallar los costos de operación y mantenimiento de un prototipo de torre de enfriamiento partiendo de una situación inicial (relleno estándar) y el relleno propuesto en la presente investigación.

5.2.1 Costos de operación y mantenimiento de un prototipo de torre de enfriamiento

Los costos asociados a la operación y mantenimiento de un prototipo de torre de enfriamiento son principalmente insumos, costos de personal y costos de mantenimiento.

A continuación, se detalla el costo anual estimado por la operación y mantenimiento de un prototipo de torre de enfriamiento, sin considerar los costos asociados al relleno de la torre:

Tabla 5.10 Costos anuales para la operación y mantenimiento de un prototipo de la torre de enfriamiento

Descripción	Valor total (USD)
Insumos anual	USD 200.00
Costo de personal anual	USD 6,000.00
Costo de mantenimiento anual	USD 400.00

Fuente. El Autor

Como la presente investigación propone una alternativa de relleno para las torres de enfriamiento, a continuación se detallan los costos anuales asociados a un relleno estándar y al relleno propuesto en la presente investigación para el prototipo de la torre de enfriamiento:

Tabla 5.11 Costos anuales de relleno estándar de un prototipo de la torre de enfriamiento

Descripción	Valor total (USD)
Relleno fílmico importado anual	USD 250.00
Unidades por año	2
Costo de relleno estándar anual	USD 500.00

Fuente. El Autor

Como se puede observar en el cuadro anterior, los costos anuales asociados al relleno estándar del prototipo de la torre de enfriamiento son aproximadamente de USD 500 anuales.

Asimismo, cabe indicar que los costos anuales por relleno estándar serían significativamente mayores en una torre de enfriamiento industrial.

Tabla 5.12 Costos anuales del relleno alternativo propuesto en la investigación de un prototipo de la torre de enfriamiento

Descripción	Valor total (USD)
Relleno alternativo anual	USD 40.00
Unidades por año	2
Costo de relleno alternativo anual	USD 80.00

Fuente. El Autor

Tal como se puede apreciar en el cuadro anterior, los costos anuales asociados al relleno propuesto en la presente investigación del prototipo de la torre de enfriamiento son aproximadamente de USD 80 anuales. El mismo que 84% menor al costo de un relleno estándar (USD 500 anuales).

5.2.2 Costos de operación y mantenimiento proyectados por el periodo de vida útil

Toda vez que el periodo de vida útil del prototipo de la torre de enfriamiento es únicamente de 5 años, se procedió a estimar los costos de operación y mantenimiento de la misma durante mencionado periodo.

Cabe indicar que, según lo señalado por la teoría económica-financiera, los costos de operación y mantenimiento se incrementarán como mínimo al porcentaje del incremento de precios del país en el cual se desarrolla las actividades, es decir a la tasa de inflación de dicho país.

Dado que la implementación del prototipo de la torre de enfriamiento se realizó en Ecuador, se procedió a obtener la tasa de inflación esperada por los siguientes cinco años de dicho país.

Al respecto, se consideró adecuado tomar las tasas de inflación esperada para el Ecuador proporcionada por el Fondo Monetario Internacional ³, el mismo que se detalla a continuación:

Tabla 5.13 Taza de inflación esperada

Año	2019	2020	2021	2022	2023
Tasa de inflación esperada	1.36%	1.53%	1.65%	1.69%	1.77%

Fuente: Fondo Monetario Internacional

Sobre la base de esta información se procedió a proyectar los costos de operación y mantenimiento por el prototipo de la torre de enfriamiento considerando el relleno estándar y el relleno alternativo propuesto en la presente investigación:

5.2.2.1 Costos de operación y mantenimiento proyectados por un prototipo de torre de enfriamiento con relleno estándar

A continuación, se detallan los costos de operación y mantenimiento del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar:

Tabla 5.14 Costos de operación y mantenimiento proyectados por un prototipo de torre de enfriamiento con relleno estándar (Sin IVA)

Año	2019	2020	2021	2022	2023
Insumos	USD 709.51	USD 720.34	USD 732.23	USD 744.57	USD 757.73
Costo de personal	USD 6,081.54	USD 6,174.34	USD 6,276.22	USD 6,382.04	USD 6,494.81
Costo de mantenimiento	USD 405.44	USD 411.62	USD 418.41	USD 425.47	USD 432.99
Costos de operación y mantenimiento	USD 7,196.49	USD 7,306.31	USD 7,426.86	USD 7,552.08	USD 7,685.52

Fuente. El Autor

³ World Economic Outlook Database, Abril 2018, Fondo Monetario Internacional.

5.2.2.2 Costos de operación y mantenimiento proyectados por un prototipo de torre de enfriamiento con relleno alternativo

A continuación, se detallan los costos de operación y mantenimiento del prototipo de la torre de enfriamiento con el relleno propuesto en la presente investigación:

Tabla 5.15 Costos de operación y mantenimiento proyectados por un prototipo de torre de enfriamiento con relleno alternativo (Sin IVA)

Año	2019	2020	2021	2022	2023
Insumos	USD 283.81	USD 288.14	USD 292.89	USD 297.83	USD 303.09
Costo de personal	USD 6,081.54	USD 6,174.34	USD 6,276.22	USD 6,382.04	USD 6,494.81
Costo de mantenimiento	USD 405.44	USD 411.62	USD 418.41	USD 425.47	USD 432.99
Costos de operación y mantenimiento	USD 6,770.78	USD 6,874.10	USD 6,987.53	USD 7,105.34	USD 7,230.89

Fuente. El Autor

5.3 Flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento

Una vez identificados la inversión y los costos de operación y mantenimiento durante la vida útil del prototipo de la torre de enfriamiento, se procedió a estimar el flujo de inversión y costos de la misma considerando el relleno estándar y el relleno alternativo propuesto en la presente investigación.

5.3.1 Flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar

A partir de la información anteriormente señalada se procedió a estimar el flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar, el mismo que se detalla a continuación:

Tabla 5.16 Flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	0	1	2	3	4	5
Costos sin IVA						
Inversión	USD 4,937.40					
Materiales para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 546.38					
Insumos para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 3,599.02					
Mano de obra para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 792.00					
Costos	USD 6,600.00	USD 7,196.49	USD 7,306.31	USD 7,426.86	USD 7,552.08	USD 7,685.52
Insumos	USD 200.00	USD 709.51	USD 720.34	USD 732.23	USD 744.57	USD 757.73
Costo de personal	USD 6,000.00	USD 6,081.54	USD 6,174.34	USD 6,276.22	USD 6,382.04	USD 6,494.81
Costo de mantenimiento	USD 400.00	USD 405.44	USD 411.62	USD 418.41	USD 425.47	USD 432.99
Total sin IVA	USD 11,537.40	USD 7,196.49	USD 7,306.31	USD 7,426.86	USD 7,552.08	USD 7,685.52

Fuente. El Autor

Así mismo se procede a detallar el flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento considerando el IVA:

Tabla 5.17 Flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar considerando el IVA.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	0	1	2	3	4	5
Costos con IVA						
Inversión	USD 5,434.85					
Materiales para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 611.95					
Insumos para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 4,030.90					
Mano de obra para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 792.00					
Costos	USD 6,672.00	USD 7,330.28	USD 7,442.14	USD 7,564.94	USD 7,692.48	USD 7,828.41
Insumos	USD 224.00	USD 794.65	USD 806.78	USD 820.09	USD 833.92	USD 848.66
Costo de personal	USD 6,000.00	USD 6,081.54	USD 6,174.34	USD 6,276.22	USD 6,382.04	USD 6,494.81
Costo de mantenimiento	USD 448.00	USD 454.09	USD 461.02	USD 468.62	USD 476.53	USD 484.95
Total con IVA	USD 12,106.85	USD 7,330.28	USD 7,442.14	USD 7,564.94	USD 7,692.48	USD 7,828.41

Fuente. El Autor

5.3.2 Flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo

De la misma forma se procedió a estimar el flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con el relleno alternativo propuesto en la presente investigación, el mismo que se detalla a continuación:

Tabla 5.18 Flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	0	1	2	3	4	5
Costos sin IVA						
Inversión	USD 4,517.40					
Materiales para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 546.38					
Insumos para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 3,179.02					
Mano de obra para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 792.00					
Costos	USD 6,600.00	USD 6,770.78	USD 6,874.10	USD 6,987.53	USD 7,105.34	USD 7,230.89
Insumos	USD 200.00	USD 283.81	USD 288.14	USD 292.89	USD 297.83	USD 303.09
Costo de personal	USD 6,000.00	USD 6,081.54	USD 6,174.34	USD 6,276.22	USD 6,382.04	USD 6,494.81
Costo de mantenimiento	USD 400.00	USD 405.44	USD 411.62	USD 418.41	USD 425.47	USD 432.99
Total sin IVA	USD 11,117.40	USD 6,770.78	USD 6,874.10	USD 6,987.53	USD 7,105.34	USD 7,230.89

Fuente. El Autor

Así mismo se procede a detallar el flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento considerando el IVA:

Tabla 5.19 Flujo de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo considerando el IVA

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	0	1	2	3	4	5
Costos con IVA						
Inversión	USD 4,964.45					
Materiales para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 611.95					
Insumos para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 3,560.50					
Mano de obra para la construcción de la torre de enfriamiento	USD 792.00					
Costos	USD 6,672.00	USD 6,853.49	USD 6,958.07	USD 7,072.88	USD 7,192.13	USD 7,319.22
Insumos	USD 224.00	USD 317.86	USD 322.71	USD 328.04	USD 333.57	USD 339.46
Costo de persona	USD 6,000.00	USD 6,081.54	USD 6,174.34	USD 6,276.22	USD 6,382.04	USD 6,494.81
Costo de mantenimiento	USD 448.00	USD 454.09	USD 461.02	USD 468.62	USD 476.53	USD 484.95
Total con IVA	USD 11,636.45	USD 6,853.49	USD 6,958.07	USD 7,072.88	USD 7,192.13	USD 7,319.22

Fuente. El Autor

5.4 Beneficiarios del prototipo de la torre de enfriamiento

Tal como se mencionó anteriormente, como parte de la presente investigación se implementará un prototipo de una torre de enfriamiento con un relleno alternativo.

Al respecto, cabe señalar que la implementación de dicho prototipo se realizará en una universidad privada, por lo cual, la presente investigación tendrá un impacto en la formación de los futuros profesionales de dicha universidad.

Asimismo, es necesario mencionar que, hasta el momento de la implementación de dicho prototipo, la universidad no contaba con ningún prototipo o torre de enfriamiento en la cual se pudiera llevar a cabo experimentos relacionados a la transferencia de calor y caída de presión, así como las aplicaciones industriales de las mismas.

Por lo tanto, los beneficiarios de la implementación del prototipo de la torre de enfriamiento serán los estudiantes universitarios que llevan materias relacionadas a termodinámica y transferencia de calor y fluidos.

En este sentido se estimó el número de alumnos beneficiarios del prototipo de la torre de enfriamiento:

Tabla 5.20 Estimado del número de alumnos beneficiarios del prototipo de la torre de enfriamiento durante su periodo de vida útil

Año	Materia: Termodinámica	Materia: Transferencia de calor y fluidos	Total
2018	168	116	284
2019	217	217	434
2020	240	240	480
2021	267	267	534
2022	272	272	544
2023	281	281	562
Total			2,838

Fuente. El Autor

Como se puede apreciar en el cuadro anterior, el total de alumnos beneficiarios del prototipo de la torre de enfriamiento será de 2,838 alumnos durante el periodo de la vida útil de la misma.

5.5 Análisis costo eficiencia del prototipo de la torre de enfriamiento

Considerando que la presente investigación tiene con justificación práctica reducir los costos de implementación de las torres de enfriamiento a partir del uso de rellenos alternativos para la misma y toda vez que los beneficiarios de la implementación del prototipo de la torre de enfriamiento corresponden a estudiantes universitarios que llevan materias relacionadas a termodinámica y transferencia de calor y fluidos.

Se consideró adecuado utilizar la metodología de costo eficiencia para determinar el impacto económico de la presente investigación.

Cabe indicar que el análisis de costo eficiencia relaciona los costos totales asociados a la implementación del proyecto, en este caso el prototipo de la torre de enfriamiento, con los beneficiarios de la misma.

Para la aplicación de esta metodología es necesario estimar el ratio costo eficiencia, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$\textbf{Ratio Costo-Eficiencia} = \textbf{VAC/Nº de beneficiarios}$$

Donde:

VAC: Es el valor actual de los costos aplicando una tasa de descuento.

Nº de beneficiarios: Número de beneficiarios durante el periodo de vida útil del proyecto

Así mismo es necesario evaluar al menos dos alternativas de solución para un mismo problema.

En relación al último punto, es necesario indicar que, tal como se mencionó anteriormente, el prototipo de la torre de enfriamiento es necesario para la adecuada formación de los estudiantes universitarios en materias de transferencia de calor y Termodinámica, así como las aplicaciones industriales de las mismas. Por lo tanto, es necesaria la implementación de dicho prototipo en la universidad ya sea con relleno estándar o el relleno alternativo propuesto en la presente investigación.

En este sentido, es factible identificar dos alternativas de solución a la necesidad de la universidad de contar con un prototipo de torre de enfriamiento.

1. La implementación de un prototipo de torre de enfriamiento con relleno estándar.
2. La implementación de un prototipo de torre de enfriamiento con relleno alternativo (el cual es propuesto en la presente investigación).

A partir de la aplicación de la metodología de costo eficiencia se procederá a determinar la mejor alternativa de solución.

5.5.1 Determinación del valor actual de los costos

Para realizar el cálculo del ratio costo – eficiencia, es necesario contar en primer lugar con el valor actual de los costos de implementación del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar y relleno alternativo.

En este sentido para traer a valor actual los flujos de inversión anteriormente detallados, es necesario contar con una tasa de descuento, la misma que fue del 12% (tasa de descuento utilizada generalmente en el Ecuador para la evaluación económica y social de proyectos).

Aplicando mencionada tasa de descuento se procedió a calcular el valor presente de los flujos de inversión y costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar y alternativo respectivamente.

Tabla 5.21 Valor Actual de los Costos del prototipo de la torre de enfriamiento

Alternativas	VAC
Prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar.	USD 39,299.91
Prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.	USD 37,060.76

Fuente. El Autor

Como se puede observar en el cuadro anterior el valor actual de los costos del prototipo de la torre de enfriamiento con el relleno alternativo propuesto en la presente investigación es menor a si se hubiera utilizado un relleno estándar.

5.5.2 Número de beneficiarios

Como se señaló anteriormente el número total de alumnos beneficiarios del prototipo de la torre de enfriamiento será de 2,838 alumnos durante el periodo de la vida útil de la misma.

5.5.3 Análisis de costo - eficiencia

A partir del Valor Actual de los Costos del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar y alternativo, así como el número de beneficiarios se procedió a calcular el ratio de costo-eficiencia de ambas alternativas. Obteniéndose el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 5.22 Ratio costo-eficiencia del prototipo de la torre de enfriamiento

Alternativas	VAC	Número de alumnos	C/E (USD)
Prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar.	USD 39,299.91	2,838	USD 13.85
Prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo.	USD 37,060.76	2,838	USD 13.06

Fuente. El Autor

Tal como se puede observar en el cuadro anterior el ratio costo eficiencia del prototipo de la torre de enfriamiento con el relleno alternativo propuesto en la presente investigación es menor al prototipo con relleno estándar, lo cual evidencia que la alternativa propuesta en la presente investigación es la más conveniente en términos económicos, toda vez que el costo por beneficiario es menor.

Cabe indicar que, si bien el presente análisis económico se realizó para únicamente para la implementación de un prototipo de torre de enfriamiento, los resultados de la misma serían similares en caso de la implementación de una torre de enfriamiento industrial, toda vez que a partir del análisis económico realizado se puede demostrar que la presente investigación reduce los costos de implementación de la misma al utilizarse materiales de relleno alternativos.

5.6 Análisis de sensibilidad del costo eficiencia del prototipo de la torre de enfriamiento

Con el fin de evaluar el ratio de costo eficiencia en diversos escenarios para el prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar, se procedió a calcular el ratio de costo eficiencia ante variaciones en la tasa de descuento y la variación del precio del relleno estándar, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5.23 Análisis de sensibilidad del costo eficiencia del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar

		Tasa de descuento				
		16%	14.0%	12%	10.0%	8%
Variación del precio del relleno estándar	50%	USD 13.30	USD 13.74	USD 14.22	USD 14.74	USD 15.30
	25%	USD 13.13	USD 13.56	USD 14.03	USD 14.54	USD 15.10
	0%	USD 12.96	USD 13.39	USD 13.85	USD 14.35	USD 14.89
	-25%	USD 12.79	USD 13.21	USD 13.66	USD 14.15	USD 14.69
	-50%	USD 12.62	USD 13.03	USD 13.48	USD 13.96	USD 14.48

Fuente. El Autor

De la misma forma se calculó el ratio de costo eficiencia para el prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo, ante variaciones en la tasa de descuento y la variación de la elaboración de la misma, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5.24: Análisis de sensibilidad del costo eficiencia del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo

		Tasa de descuento				
		16%	14.0%	12%	10.0%	8%
Variación de la elaboración del relleno alternativo	50%	USD 12.28	USD 12.68	USD 13.12	USD 13.59	USD 14.10
	25%	USD 12.26	USD 12.66	USD 13.09	USD 13.56	USD 14.07
	0%	USD 12.23	USD 12.63	USD 13.06	USD 13.53	USD 14.03
	-25%	USD 12.20	USD 12.60	USD 13.03	USD 13.50	USD 14.00
	-50%	USD 12.17	USD 12.57	USD 13.00	USD 13.46	USD 13.97

Fuente. El Autor

A partir del análisis de sensibilidad del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno estándar y relleno alternativo, se puede concluir que incluso ante una subida de la elaboración de relleno alternativo en un 50% y la reducción del precio del relleno estándar en un 50%, la alternativa propuesta en la presente investigación sería la más conveniente en términos económicos, toda vez que el costo por beneficiario seguiría siendo menor.

CONCLUSIONES

Al finalizar la presente investigación, se pone a disposición de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Industrial una TE de tiro inducido a contraflujo, con fines didácticos para su reforzamiento en la parte práctica lo aprendido teóricamente en las materias de termodinámica y transferencia de calor y fluidos.

1. Se diseñó e implementó una 'torre de enfriamiento de tiro inducido de flujo en contracorriente', con dimensiones de 0.44x0.44x1.82m, la cual consta con una pared que se puede desmontar e incluye un sistema de calentamiento de agua, además los diferentes elementos del que consta el prototipo de torre de enfriamiento son los siguientes: Flujo de agua a enfriar 0.2 Kg/s, flujo de aire 0.4 Kg/s, Bomba de agua con un caudal mínimo de 15 l/m con sus respectivas líneas de distribución de agua, ventilador de 0.35 m³/s, material del relleno alternativo teflón de forma panal, área de la sección transversal 0.188m².
2. Se demostró que la variación en la velocidad del aire y el flujo másico de agua por área generan un cambio en la caída de presión a través del relleno alternativo mediante pruebas de contraste de hipótesis, la prueba de Anova mostró que el valor-p = 0 de la prueba F es suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que los coeficientes del modelo son todos cero en favor de la hipótesis alterna que indica que al menos un coeficiente no es cero y por ende este modelo es estadísticamente significativo con al menos una de las variables independientes velocidad o masa de agua, el valor-p=0 de la prueba t-student del coeficiente de la variable velocidad, es evidencia suficiente para inferir que el coeficiente de la variable velocidad es estadísticamente significativo, el valor-p= 0,47 es evidencia estadística para inferir que el coeficiente de la variable masa de agua es significativo y por lo tanto ambas variables sirven estadísticamente para demostrar los cambios de presión.

3. Se demostró que la variación en el 'flujo másico del aire por unidad de área' genera un cambio en la 'tasa global de transferencia de masa' a través del 'relleno alternativo' del prototipo de torre de enfriamiento, mediante la prueba t-student se muestra que el valor-p del coeficiente masa de aire es 0,00 indicando que rechaza la hipótesis nula de que el coeficiente es cero en favor de la hipótesis alterna, concluyendo que existe evidencia estadística suficiente para inferir que el flujo másico de aire por unidad de área genera cambios en la 'tasa global de transferencia de masa'.
4. Se demostró que la variación en el 'flujo másico de agua por unidad de área' genera un cambio en la 'tasa global de transferencia de masa' a través del 'relleno alternativo' del prototipo de torre de enfriamiento, mediante la prueba t-student se muestra que el valor-p del coeficiente de masa de agua es 0,00 indicando que la probabilidad de que la hipótesis nula de que el coeficiente β_1 sea nada significativo, es casi cero por lo que se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alterna de que el coeficiente β_1 es significativo, concluyendo que existe evidencia estadística suficiente para inferir que el 'flujo másico de agua por unidad de área' genera cambios en la 'tasa global de transferencia de masa'.
5. Se demostró que la variación en el 'flujo másico de agua por unidad de área y el flujo másico de aire por área' generan un cambio en la 'tasa global de transferencia de masa' a través del 'relleno alternativo' mediante pruebas de contraste de hipótesis, la prueba de Anova mostró que el valor-p = 0,00 de la prueba F es suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que los coeficientes del modelo son todos cero en favor de la hipótesis alterna que indica que al menos un coeficiente no es cero y por ende este modelo es estadísticamente significativo con al menos una de las variables

independientes flujo másico de aire o flujo másico de agua, el valor- $p=0$ de la prueba t-student del coeficiente de la variable flujo másico de agua, es evidencia suficiente para inferir que el coeficiente de la variable flujo másico de agua es estadísticamente significativo, el valor- $p=0,00$ de la prueba t-student del coeficiente de la variable flujo másico de aire es evidencia estadística para inferir que el coeficiente de la variable flujo másico de aire es significativo y por lo tanto ambas variables sirven estadísticamente para demostrar los cambios de la tasa global de transferencia de masa.

6. Se demostró que a medida que se varió la velocidad del aire en el rango de 0.1 hasta 1.84 m/s y con flujo de agua por unidad de área se generó un cambio en la caída de presión de 9,95 a 179,16 Pascales y utilizando el modelo matemático de Cobb-Douglas se logró obtener la correlación de caída de presión para el relleno alternativo, siendo esta:

$$\Delta P = 62.81 * v^{1.026} * \dot{m}_{agua/area}^{0.333}$$

7. Se demostró que a medida que se varió el flujo de agua por unidad de área en rangos de 0.70 hasta 1.33 Kg/sm² y el 'flujo de aire por unidad de área' en rangos de 0.11 hasta 2.10 Kg/sm² se generó un cambio en la 'tasa global de transferencia de masa' de 0.103 a 0.913 Kg/sm³ y utilizando el modelo matemático de Cobb-Douglas se logró obtener la correlación de tasa global de transferencia de masa para el relleno alternativo, siendo esta:

$$KXA = 0.343 (\dot{m}_{agua/area})^{1.833} (\dot{m}_{aire/area})^{0.536}$$

8. La inversión recoge todos los costos necesarios para la implementación de un proyecto, en este caso para la implementación de un prototipo de una torre de enfriamiento con el relleno alternativo es de \$4964.45. Asimismo, la vida útil de un proyecto se encuentra asociado a la obsolescencia del activo principal la misma que corresponde a 5 años, se realizó el análisis económico de la

implementación del prototipo de la torre de enfriamiento con relleno alternativo y relleno estándar donde se demostró el impacto económico del uso de materiales reciclados en las torres de enfriamiento, asimismo, se detalló los cálculos relacionados a la inversión del prototipo de la torre de enfriamiento, los costos y gastos asociados a su operación y los beneficiarios de la misma, siendo el análisis de costo eficiencia para 2838 alumnos beneficiarios de 13.85 USD para una TE con relleno estándar y de 13.06 USD para una TE con relleno alternativo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda estudiar otros tipos de materiales los cuales puedan ser utilizados como relleno para la torre de enfriamiento, siempre tratando de obtener menores costos y mejorando la eficiencia de la misma.
2. Realizar un programa de mantenimiento con el objetivo de mantener en óptimas condiciones de desempeño y funcionabilidad a la torre de enfriamiento.
3. Realizar la compra de un sistema de tratamiento del agua para la torre de enfriamiento, ya que esto mejorará la transferencia de calor por ende el aumento en el rendimiento térmico, menor consumo de energía, menor consumo de desinfectantes, menor consumo de cloro, reducción en costes de mantenimiento
4. Una vez que ya entré en funcionamiento la torre de enfriamiento y antes de que comience a ser utilizada, en el próximo periodo académico por parte de los beneficiarios, se recomienda al encargado del laboratorio de termofluidos, realizar el respectivo manual de prácticas, para el correcto desempeño del equipo y adecuada transmisión de conocimiento a los beneficiarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alamo, J. J., & Fernandez, R. M. (2014). Obtenido de
file:///C:/Users/Pame/Downloads/Prestaciones%20termo-electro-
fluidodinamicas%20de%20una%20torre%20de%20enfriamiento%20d
e%20agua%20de%20tiro%20forzado.pdf
- Ávila, A. (2001). *Metodología de la Investigación*. Lima, Perú: Estudios y Ediciones R.A.
- Ballestrini, M. (2006). Como se elabora el Proyecto de Investigación.
- Bernal, C. (2006). *Metodología de la Investigación*. México: Pearson.
- Briones, G. (2001). *Metodología de la Investigación cuantativa en las ciencias sociales*. Bogota, Colombia.
- Bunge, M. (1959). *La ciencia. Su método y su filosofía*. Buenos Aires: Sudamericana.
- Cabezas, S. (2011). El origen del aire acondicionado. Obtenido de
<https://www.fayerwayer.com/2011/08/el-origen-de-el-aire-acondicionado/>
- Carrasco, S. (2013). *Metodología de la Investigación Científica*. Lima: Editorial San Marcos.
- Climayoreo. (2019). *climayoreo.com*. Obtenido de
<http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>
- Córdova, H. (2009). Historia y principios de la refrigeración y aire

acondicionado. Obtenido de <https://docplayer.es/67764490-Historia-y-principios-de-la-refrigeracion-y-aire-acondicionado.html>

Díaz, Y. (2016). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/315111140_Calculo_y_seleccion_de_las_torres_de_enfriamiento_de_la_Empresa_Siderurgica_Jose_Marti

EWK Torres de Refrigeración. (2016). Equipos de enfriamiento evaporativo. Torres de refrigeración: Fundamento, tipos y normativa. Obtenido de <http://torresderefrigeracion.org/>

García, J. (2015). Resumen de la Historia de la Refrigeración. Obtenido de https://www.academia.edu/10854780/Resumen_de_la_Historia_de_la_Refrigeración

Glaciar Ingeniería. (2015). Torres de enfriamiento.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2006). Metodología de la Investigación.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: MCGRAW-HILL.

Kern, D. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. Mexico.

Kuhn, T. (1971). *Estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica. Obtenido de <https://materiainvestigacion.files.wordpress.com/2016/05/kuhn1971.pdf>

Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social [MSCBS]. (2004). Capítulo 4 Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.

España. Obtenido de
https://www.mscbs.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/.../4_leg.pdf

Mor Fernández, J. (2004). Problemática sanitaria y ambiental de las torres de refrigeración y condensadores evaporativos. Barcelona, España.

Murillo, W. (2008). La Investigación Científica.

Negre, J. (2019). Rellenos para torres de refrigeración. Barcelona, España. Obtenido de <http://jnegre.es/Descargas/farciment.pdf>.

Obregón, L., Pertuz, J., & Domínguez, R. (2017). Análisis del desempeño de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio para diversos materiales de empaque, temperatura de entrada de agua y relación de másica de flujo agua - aire. *Prospectiva*, 15(1), 42-52. Obtenido de www.scielo.org.co/pdf/prosp/v15n1/1692-8261-prosp-15-01-00042.pdf

Ramírez, D., & Villarreal, U. (2008). *Evaluación del desempeño térmico de la torre de enfriamiento CT-502*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.../Tesis_Completa.pdf?...

Ramón, G. (2000). Diseños experimentales. Colombia: Universidad de Antioquia. Obtenido de viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf

Restrepo, J. R. (2011). 1. Diseño operacional de una torre de enfriamiento adiabática de agua de tiro mecánico inducido contracorriente a escala de laboratorio. . Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/142022.pdf>

Reyes, G. (2015). *Cálculo térmico y estructural de cámara frigorífica para la refrigeración de pescado y camarón, ubicada en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa*. México: Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/20018/Alva%20Reyes%20Gabriel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sirena, J., Galeasso, Á., & Najle, P. (2010). Predicción y evaluación empírica del coeficiente de pérdida de carga en rellenos de torres de enfriamiento de agua. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 14, 25-40. Obtenido de <https://www2.uned.es/ribim/v14n2Octubre10.html>

Tamayo, M. (2010). *El Proceso de la Investigación Científica*. Mexico.

Villa, S. (2008). *Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Villa, S. (2008). Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental. Guayaquil. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/862/1/1632.pdf>

Zorrilla, S. (1993). *Introducción a la Metodología de la Investigación*.

PAGINAS WEB CONSULTADAS

- <https://www.finecontrols.co.uk/flow-control/flow-meters/siemens-danfoss-sitrans-f-up-1010-portable-clamp-on-ultrasonic-flow-meter>
- <https://grupowys.com/catalogo-de-productos/siemens/ventiladores-industriales/ventiladores>

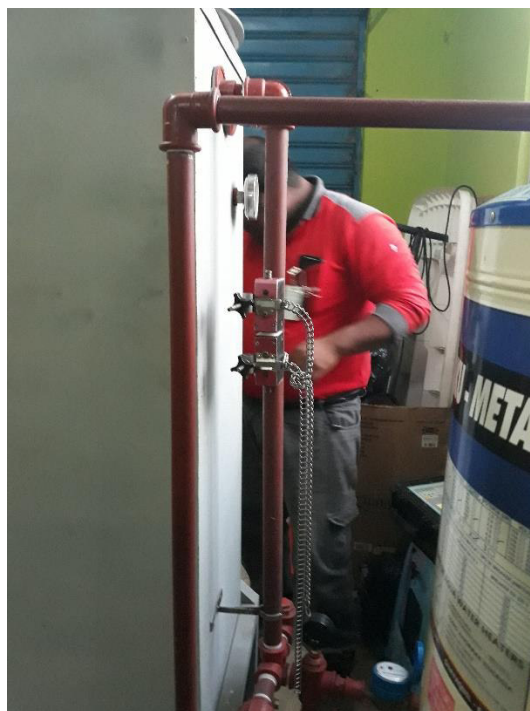
ANEXOS

ANEXO 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA

MATRIZ DE CONSISTENCIA LÓGICA						
Título: Diseño e implementación de una torre de enfriamiento con un relleno alternativo identificando las correlaciones de la tasa global de transferencia de calor y caída de presión						
Autor: Armando Fabrizio López Vargas						
OBJETIVO DE CONOCIMIENTO	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	MARCO TEORICO
PROBLEMA						
GENERAL	GENERAL	GENERAL	VI: Diseño e implementación de un prototipo de torre de enfriamiento con un relleno alternativo	Velocidad del aire Caída de presión Temperaturas	Equipo de laboratorio, Manómetro, Variador de velocidad, controlador de temperatura, Anemómetro, caudalímetro, higrómetro	Mecánica de los fluidos y Transferencia de Calor
¿Cómo se obtiene las correlaciones de tasa global de transferencia de calor y caída de presión si se diseña e implementa un prototipo de la torre de enfriamiento con un relleno alternativo?	Obtener las correlaciones de tasa global de transferencia de calor y caída de presión si se diseña e implementa un prototipo de la torre de enfriamiento con un relleno alternativo	Con el diseño e implementación de un prototipo de torre de enfriamiento con un relleno alternativo se obtendrá las correlaciones de tasa global de transferencia de calor y caída de presión	VD: Las correlaciones de la tasa global de transferencia de calor y caída de presión.	Flujo másico de agua Flujo másico de aire Condiciones ambientales		
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS				
¿Cómo la variación en la velocidad del aire genera un cambio en la caída de presión a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento?	Demostrar como la variación en la velocidad del aire genera un cambio en la caída de presión a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento	La variación en la velocidad del aire generará un cambio en la caída de presión a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento	VI: Velocidad del aire	Velocidad	Equipo de laboratorio, Manómetro, Variador de velocidad, controlador de temperatura, Anemómetro, caudalímetro, higrómetro	Mecánica de los fluidos y Transferencia de Calor
			VD: Caída de presión	Caída de presión		
¿Cómo la variación en el flujo másico del aire por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento?	Demostrar como la variación en el flujo másico del aire por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento	La variación en el flujo másico del aire por unidad de área generará un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento	VI: Flujo másico del aire	Caudal	Equipo de laboratorio, Manómetro, Variador de velocidad, controlador de temperatura, Anemómetro, caudalímetro, higrómetro	Mecánica de los fluidos y Transferencia de Calor
			VD: Tasa global de transferencia de calor	Unidades de transferencia		
¿Cómo la variación en el flujo másico del agua por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento?	Demostrar como la variación en el flujo másico del agua por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento	La variación en el flujo másico del agua por unidad de área generará un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento	VI: Flujo másico del agua	Caudal	Equipo de laboratorio, Manómetro, Variador de velocidad, controlador de temperatura, Anemómetro, caudalímetro, higrómetro	Mecánica de los fluidos y Transferencia de Calor
			VD: Tasa global de transferencia de calor	Unidades de transferencia		
¿Cómo la variación en el flujo másico del agua y aire por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento?	Demostrar como las variaciones en el flujo másico de agua y aire por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento	Las variaciones en el flujo másico de agua y en el flujo másico de aire por unidad de área generará un cambio en la tasa global de transferencia de calor a través del relleno alternativo del prototipo de torre de enfriamiento	VI: Flujo másico del agua y aire	Caudal	Equipo de laboratorio, Manómetro, Variador de velocidad, controlador de temperatura, Anemómetro, caudalímetro, higrómetro	Mecánica de los fluidos y Transferencia de Calor
			VD: Tasa global de transferencia de calor	Unidades de transferencia		

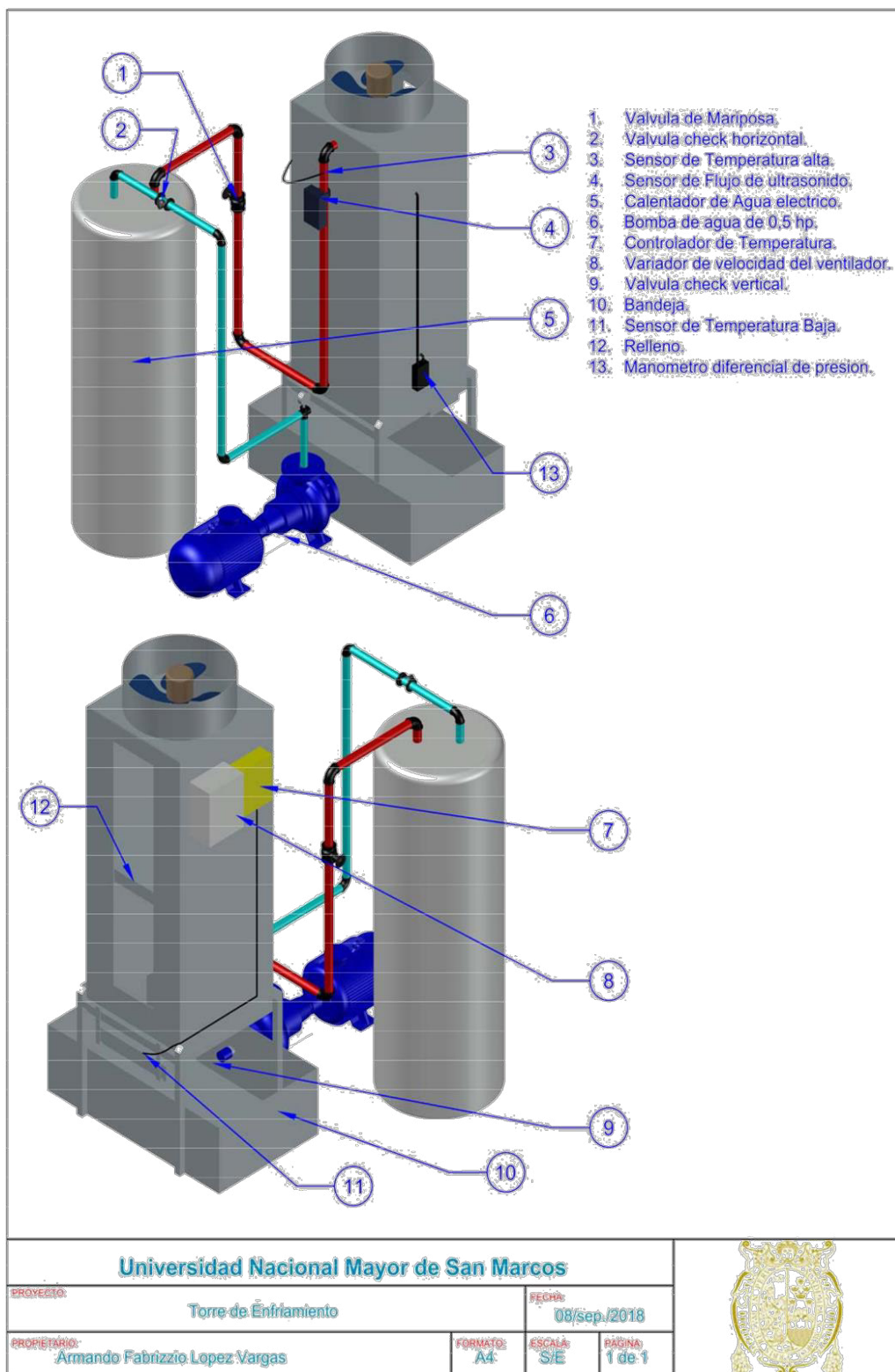
FUENTE. EL AUTOR

ANEXO 2 PROCESO DE ENSAMBLE DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO



FUENTE. EL AUTOR

ANEXO 3 TORRE DE ENFRIAMIENTO



FUENTE. EL AUTOR

ANEXO 4 FLOW MEASUREMENT

© Siemens AG 2010

Flow Measurement SITRANS F US Clamp-on

SITRANS FUP1010 (portable)

Overview



SITRANS FUP1010 clamp-on non-intrusive ultrasonic flow transmitter offers maximum versatility plus battery power for portable field use. It can operate in either WideBeam transit time or re-flexor (Doppler) mode, making it suitable for virtually any liquid, even those with high aeration or suspended solids.

SITRANS FUP1010 is available in single and dual channel or dual path configurations, with IP67 weatherproof enclosure.

Benefits

- Battery power facilitates field use; the meter is easily transported from one installation to another – saving time for surveys, monitoring and temporary installations
- Weatherproof enclosure can be used outdoors and left in place without concern for rain damage
- Rugged plastic case enables it to withstand rough treatment that would destroy most other meters
- Versatility - there is no need to change meters when operating conditions change
- Easy installation; no need to cut pipe or stop flow
- Minimal maintenance; external sensors do not require periodic cleaning
- No moving parts to wear or foul
- No pressure drop or energy loss
- Wide turn-down ratio
- Choice of single or dual channel models minimizes total cost
- ZeroMatic Path automatically sets zero without stopping flow and reduces zero drift, even at low flow
- Note that the FUP1010 flow transmitter is not available with hazardous area approvals

Application

FUP1010 is suitable for a wide variety of liquid applications, including the following:

- Water industry
 - Raw water
 - Potable water
 - Chemicals
- Wastewater industry
 - Raw sewage
 - Effluent
 - Sludges
 - Mixed liquor
 - Chemicals
- HVAC industry
 - Chillers
 - Condensers
 - Hot and cold water systems
 - Thermal energy rate and total
- Power industry
 - Nuclear
 - Fossil
 - Hydroelectric
- Processing industry
 - Process control
 - Batching
 - Rate indication
 - Volumetric and mass measurement

Design

- IP67 Weatherproof / Impact resistant enclosure constructed of mineral reinforced copolymer polypropylene
 - Single channel
 - Dual channel / dual path

Function

- Integral 33 button keypad and large (128 x 240 pixel) graphic display visible up to 12 m (40 ft) away
- Current, voltage, frequency and RS232 outputs (see specification section for details)
- Optional current, voltage and temperature inputs (see specification section for details)
- ZeroMatic Path automatically sets zero
- Bi-directional flow operation
- 1 MByte data logger with both site and data logger storage
- English, spanish, german, italian and french language options

4

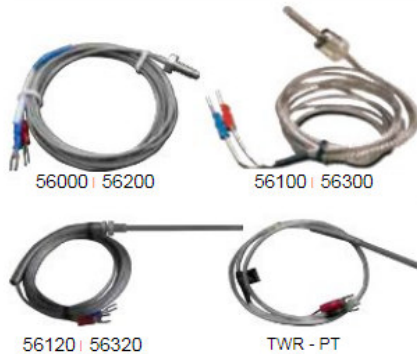
FUENTE. OBTENIDO DE: <https://www.finecontrols.co.uk/flow-control/flow-meters/siemens-danfoss-sitrans-f-up-1010-portable-clamp-on-ultrasonic-flow-meter>

ANEXO 5 SENSORES DE TEMPERATURA



56000 / AP161J

Tipo: J
 Temperatura de trabajo: 450° (max)
 Diámetro tornillo: 1/4"
 Cable de extensión: 2 m(en fibra de vidrio -
 enmallado)
 Origen: China



SENSORES DE TEMPERATURA

EBCHQ

REF	TIPO R. TRABAJO Ø BULBO MONTAJE EXTENSIÓN				
56000	Termocupla tipo J	0 a 450°C	N/A	Tornillo	Fibra de vidrio enmallada 2m
56100				Bayoneta	
56120			3/16'x 10cm	Racor 5/16'	
56200	Termocupla tipo K		N/A	Tornillo	
56300				Bayoneta	
56320			3/16'x 10cm	Racor 5/16'	
TWR-PT	RTD Pt-100	0 a 200°C	3/16'x 5cm		FV enmallada 80cm Autonics

FUENTE. OBTENIDO DE: <http://jngdelecuador.com/catalogos-digitales/>

ANEXO 6 CONTROLADOR DE TEMPERATURA TCN4S



■ Ordering information

T	CN	4	S	—	2	4	R
Item	Setting type	Digit	Size	Auxiliary output	Power supply	Control output	
						R	Relay contact output+SSRP output (AC power) Relay contact output+SSR output (AC/DC power)
					2		24VAC 50/60Hz, 24-48VDC
					4		100-240VAC 50/60Hz
					2		Alarm1+Alarm2 output
					S		DIN W48×H48mm
					M		DIN W72×H72mm
					H		DIN W48×H96mm
					L		DIN W96×H96mm
					4		9999(4digit)
					CN		Dual display type, set by touch switch
					T		Temperature controller

■ Specifications

Series		TCN4S	TCN4M	TCN4H	TCN4L
Power supply	AC power	100-240VAC 50/60Hz			
	AC/DC power	24VAC 50/60Hz, 24-48VDC			
Allowable voltage range		90 to 110% of rated voltage			
Power consumption	AC power	Max. 5VA(100-240VAC 50/60Hz)			
	AC/DC power	Max. 5VA(24VAC 50/60Hz), Max. 3W(24-48VDC)			
Display method		7 Segment (PV: red, SV: green), Other display(green, red) LED			
Character size	PV(W×H)	7.0×15.0mm	9.5×20.0mm	7.0×14.6mm	11.0×22.0mm
	SV(W×H)	5.0×9.5mm	7.5×15.0mm	6.0×12.0mm	7.0×14.0mm
Input type	RTD	DPT100Ω, Cu50Ω (allowable line resistance max. 5Ω per a wire)			
	Thermocouple	K(CA), J(IC), L(IC), T(CC), R(PR), S(PR)			
Display accuracy ^{※1}	RTD	* At room temperature (23°C ±5°C): (PV ±0.5% or ±1°C, select the higher one) ±1digit			
	Thermocouple	* Out of room temperature range: (PV ±0.5% or ±2°C, select the higher one) ±1digit			
Control output	Relay	250VAC 3A 1a			
	SSR	12VDC ±2V 20mA Max.			
Alarm output		AL1, AL2 Relay output: 250VAC 1A 1a			
Control method		ON/OFF control, P, PI, PD, PID control			
Hysteresis		1 to 100°C/°F (0.1 to 50.0°C/°F) variable			

※1: ① At room temperature (23°C ±5°C)

- Thermocouple C R, S type, below 200°C: (PV ±0.5% or ±3°C, select the higher one) ±1digit
- Thermocouple R, S type, over 200°C: (PV ±0.5% or ±2°C, select the higher one) ±1digit
- Thermocouple L(IC) type, RTD Cu50Ω: (PV ±0.5% or ±2°C, select the higher one) ±1digit
- ② Out of room temperature range
- Thermocouple R, S type, below 200°C: (PV ±1.0% or ±6°C, select the higher one) ±1digit
- Thermocouple R, S type, over 200°C: (PV ±0.5% or ±5°C, select the higher one) ±1digit
- RTD Cu50Ω: (PV ±0.5% or ±3°C, select the higher one) ±1digit

Autonics

H-41

FUENTE. OBTENIDO DE: <http://ingdelecuador.com/catalogos-digitales/>

ANEXO 7 VARIADOR STARVERT IE5

Smaller micro size

Our iE5 realizes 5% smaller micro size comparing to previous product.



Easy operation and control

The operation became easy by adopting the 6 keys and volume resistor types on the loader. Besides, convenience is guaranteed by limiting the total number of parameters as 100 parameters.



Standard Specification

Basic specification

Model : SV ~ ~ iE5 ~		001-1	002-1	004-1	001-2	002-2	004-2	
Applicable motor		[HP]	1/8	1/4	1/2	1/8	1/4	1/2
		[KW]	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4
Rated output	Rated capacity [kVA]	0.3	0.6	0.95	0.3	0.6	1.14	
	Rated current [A]	0.8	1.4	2.5	0.8	1.6	3.0	
	Output frequency [Hz]	0 ~ 200 [Hz]						
	Output voltage [V]	3 phase 200 ~ 230V						
Rated input	Applicable voltage [V]	1 phase 200 ~ 230 VAC (± 10%)			3 phase 200 ~ 230 VAC (± 10%)			
	Input frequency[Hz]	50 ~ 60 [Hz] (± 5%)						
	Rated current [A]	2.0	3.5	5.5	1.2	2.0	3.5	

FUENTE. OBTENIDO DE:

<https://www.tme.eu/es/Document/86e0bc2b2fb0705130dbdaa07946430e/iE5%20series.PDF>

ANEXO 8 TERMOHIGROANEMOMETRO

Termohigroanemometro de mano. Mide temperatura, humedad y velocidad de viento. Marca V&A, modelo VA8021

Código: TYH-00241



Termohigroanemometro de mano. Mide temperatura, humedad y velocidad de viento. Marca V&A, modelo VA8021

Especificaciones:

- . Parámetros de Medida: m/s, km/h, fpm, mph, nudos, Beaufort, % HR (humedad relativa), td (punto de rocío)
- . Rango: 0.4 m/s a 20 m/s, 80 ppm a 4000 ppm, 0% a 100% RH, -10 a +50°C, 14°F a 122°F
- . Resolución: : 0,1 m / s, 1 fpm, 0.1 % HR, 0,1 °C, 0,1 °F
- . Precisión: ± (2 % de la lectura + 0,3 m/s)
- ± (2 % de la lectura + 60 fpm)
- ± 8 % HR (5% a 95% RH)
- ± 1°C, ± 1,8°F
- . Función especial: Apagado automático
- . Pantalla: pantalla de sobrecarga
- . Indicador de batería baja
- . Dimensiones: 157 x 60 x 30 mm
- . Peso: 180 g
- Los accesorios incluyen:
- . 1.5V baterías x 3 AAA
- . Cubierta protectora
- . Cierre libre caso protector
- . Correa para la muñeca
- . Manual del usuario

Garantía, 6 meses.

Marca:V&A

FUENTE. OBTENIDO DE: <https://www.zelian.com.ar/termohigroanemometro-de-mano-mide-temperatura-humedad-y-velocidad-de-viento-marca-v-a-modelo-va8021--det--TYH-00241>

ANEXO 9 TANQUE CALENTADOR DE AGUA



FABRICADO POR		S.S. REPRESENTACIONES	
MARCA		SAKUMETAL	
MODELO TENSION NOMINAL (V) CAP. NOMINAL (LITRO)	MODELOS	VOLTIOS	LITROS
	SM-10 <input type="checkbox"/>	110 <input type="checkbox"/> 220 <input type="checkbox"/>	40L. <input type="checkbox"/>
	SM-15 <input type="checkbox"/>	110 <input type="checkbox"/> 220 <input type="checkbox"/>	60L. <input type="checkbox"/>
	SM-20 <input type="checkbox"/>	110 <input type="checkbox"/> 220 <input type="checkbox"/>	80L. <input type="checkbox"/>
	SM-30 <input type="checkbox"/>	110 <input type="checkbox"/> 220 <input type="checkbox"/>	120L. <input type="checkbox"/>
	SM-40 <input checked="" type="checkbox"/>	110 <input type="checkbox"/> 220 <input checked="" type="checkbox"/>	160L. <input checked="" type="checkbox"/>
	SM-60 <input type="checkbox"/>	110 <input type="checkbox"/> 220 <input type="checkbox"/>	240L. <input type="checkbox"/>
	SM-5C <input type="checkbox"/>	110 <input type="checkbox"/> 220 <input type="checkbox"/>	20L. <input type="checkbox"/>
PRESIÓN NOMINAL (MPa)		0.83 MPa	
POTENCIA NOMINAL (kW)		1.5 <input type="checkbox"/> 2.0 <input type="checkbox"/> 2.5 <input type="checkbox"/> 3.0 <input type="checkbox"/> 4.0 <input checked="" type="checkbox"/> 5.0 <input type="checkbox"/>	
TEMPERATURA DE ENSAYO DEL AGUA: fría: 15°C / caliente 65°C → INGRESA 20°C // EGRESA → 60°C PROM.			
MÁS EFICIENTE MENOS EFICIENTE		A	
CONSUMO DE ENERGÍA MENSUAL (kW/h) Con una extracción completa de agua caliente		13.2kW/h. MENSUAL *VALOR RELATIVO AL MODELO	
TEMPERATURA MEDIA DEL AGUA EXTRAÍDA °C		50°C PROMEDIO.	
Tiempo de calentamiento (hh:mm) (AT= 50°C)		30min. <input type="checkbox"/> 1h. <input type="checkbox"/> 1:30min. <input checked="" type="checkbox"/> *TIEMPOS RELATIVOS A MODELO Y REGIÓN	

FUENTE. OBTENIDO DE: <http://codi.com.ec/job/saku-metal/>

ANEXO 10 WATER PUMP QB-60

KING GIANT

QB Series

ELECTRIC CLEAN WATER PUMP

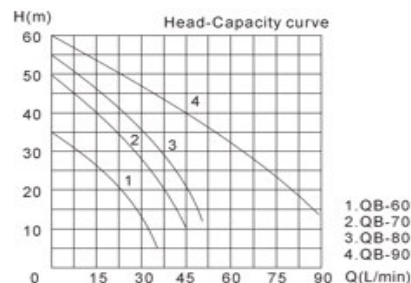
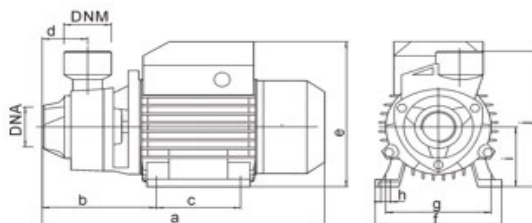
QB series clean water pumps are high efficient household electric pumps, with the miniature heavy-duty electric motor and the peripheral pump couple directly. They have the advantages of simple construction, small measurement, light weight, higher head, easy operation and maintenance. They do well in carrying clean water or the liquid whose physical and chemical nature similar to clean water, not exceeding 60°C. They are ideal for household well water pumping, water injection supplying, car washing, and garden watering etc.



DB-750A

CONSTRUCTION

PUMP PARTS:
 Pump Body: Cast Iron
 Impeller: Brass
 Mechanical Seal: Ceramic / Ceramic / Stainless Steel
 Front Cover: Cast Iron / Aluminum with Electrolysis
MOTOR: Single Phase Heavy Duty Continuous Work
 Motor Model: 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
 Shaft: Carbon Steel / Stainless Steel
 Insulation Class: Class F
 Protection: IP44 / IP54
 Condition: Factory sealed



OVERALL & INSTALLATION DIMENSIONS

Model	DIMENSIONS (mm)														
	DNA	DNM	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
QB-60	1"	1"	265	110	80	45	151	118	100	10	63	138	--	--	--
QB-70	1"	1"	305	122	90	50	181	136	112	10	71	150	--	--	--
QB-80	1.5"	1.5"	305	122	90	50	181	136	112	10	71	150	--	--	--
QB-90	1.5"	1.5"	380	138	100	68	182	180	162	10	80	156	--	--	--

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Model	Power		Q.max. H.max. Suct.max. Speed		Inlet/Outlet		PACKAGE DIMENSIONS & G.W.				
	HP	kW	L/min	m	m	r.p.m	mm	A	B	H	kg
QB-60	0.5	0.37	35	35	9	2850	25x25	285	145	175	5.3
QB-70	0.75	0.55	45	50			25x25	335	180	200	9.5
QB-80	1	0.75	50	55			40x40	335	180	200	10.0
QB-90	1.5	1.1	90	60			40x40	425	200	225	22.0

H
A B
(mm)



* 110V, 110V/220V, 60Hz etc. models are available on request.

FUENTE. OBTENIDO DE: <http://www.pumpfundamentals.com/pumpdatabase2/kinggiant-qb.pdf>

ANEXO 11 MEDIDOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Código	154400
Referencia	886
Rango / Resolución	0.00 a ± 60.00 in H ₂ O / 0.01 in H ₂ O
Unidades de medida	in H ₂ O, mm H ₂ O, mBar, psi
Calibración	Cero y span por teclado
Funciones	Cambio de unidades de medida, Doble display

FUENTE. OBTENIDO DE: <http://viaindustrial.com.ec/producto.asp?codigo=154400>